

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Приладобудівний**  
(повна назва інституту/факультету)

**Приладів і систем орієнтації та навігації**  
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»  
УДК 531.383

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри  
Бурау Н.І.  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” 2018 р.

## Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) \_\_\_\_\_  
(код і назва спеціальності)

151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
на тему: Вдосконалення методів компенсації похибок  
мікромеханічних гіроскопів

Виконав (-ла): студент (-ка) 2 курсу, групи ПГ-71мп  
(шифр групи)

Ярема Анна Дмитрівна  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник доц. к.т.н. Лакоза С.Л.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант Розроблення стартап-проекту  
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2018 року

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається з 105 сторінок, в ній міститься 33 рисунки, 40 таблиць, використано 71 джерело.

**Актуальність.** Останні роки все більш широкого поширення набули гіроскопи, засновані на мікроелектромеханічних системах (МЕМС), популярність яких обумовлюється, в першу чергу, малими габаритами, низьким енергоспоживанням і низькою вартістю. Вони знайшли застосування в областях керування рухомими об'єктами (автомобілі, авіація, ракети), в системах навігації, машинобудуванні та вимірювальній техніці, геологорозвідувальній апаратурі, робототехніці. Проте виникли проблеми їх використання при роботі в реальних умовах (вібрація, удари, акустичні впливи, зміна температури). Збереження високих точностних характеристик в широкому діапазоні кутових швидкостей при жорстких механічних і температурних впливах в наш час являється однією з основних цілей при проектуванні мікромеханічних гіроскопів.

Магістерська дисертація виконана відповідно до основних напрямків наукових досліджень кафедри.

**Мета магістерської дисертації:** підвищення точності та завадостійкості мікромеханічного гіроскопа RR-типу при дії широкосмугової вібрації, мінімізація впливу дії прискорень на вихідний сигнал.

### **Завдання:**

1. Характеристика областей застосування ММГ.
2. Огляд сучасного стану розробок мікромеханічних датчиків кутової швидкості.
3. Опис та порівняльний аналіз впливу основних збурюючих факторів.
4. Опис варіантів системи керування первинними коливаннями.

5. Детальний аналіз хибних деформацій та прогинів чутливого елемента під дією зміни температури та вібрації.
6. Опис математичної моделі.
7. Створення імітаційної Simulink-моделі. Дослідження основних режимів роботи для ідеального ММГ, впливу прискорення на точність датчика. Дослідження впливу розузгодження частот інерційного тіла та рухомих елементів.
8. Розробка способів/методик для зменшення впливу вібрації. Моделювання запропонованих рішень.

**Об'єкт:** мікромеханічний гіроскоп RR-типу.

**Предмет:** підвищення точності та завадостійкості мікромеханічного гіроскопа RR-типу при дії широкосмугової вібрації, мінімізація впливу дії прискорень на вихідний сигнал.

**Методи дослідження:** для розв'язку поставленої задачі в роботі застосовано синхронний детектор, реалізований в програмному забезпеченні «Solid Works» для усунення високочастотної складової вторинних коливань ММГ.

**Наукова новизна:**

1. Розроблено структурну та конструктивно-кінематичну схему двохмасового гіроскопа RR-типу з рухомими електродами з підвищеною стійкістю до дії лінійного прискорення.
2. Розроблено імітаційну модель двохмасового гіроскопа RR-типу.

**Практичне значення:** розроблено Simulink-модель та Matlab-модель одномасового ММГ RR-типу; розроблено Simulink-модель та Matlab-модель двохмасового ММГ RR-типу; розроблено алгоритмічне забезпечення для демодуляції амплітудно-модульованого сигналу для аналізу інформаційних (вторинних) коливань.

**Апробація результатів дисертації (виступи на науково технічних конференціях):**

1. XI Всеукраїнська науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування», Київ, 2018.

**Бібліографічні посилання**

Ярема А.Д. Аналіз конструкції мікромеханічних гіроскопів стосовно впливу дії прискорень / А. Ярема // XI Всеукраїнська науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування» - Київ, 2018.-с.67

**Ключові слова:** інерціальна система, мікромеханічний гіроскоп, підвищення точності, інерційне тіло, кутова швидкість, рухомий електрод, прискорення, вібрація.

## ABSTRACT

The master's dissertation consists of 113 pages, it contains 33 drawings, 40 tables, 71 sources are used.

**Topicality.** In recent years, gyroscopes based on microelectromechanical systems (MEMS) have become increasingly widespread, the popularity of which is primarily due to small dimensions, low power consumption and low cost. They have found application in areas of management of moving objects (cars, aviation, rockets), in navigation systems, engineering and measuring technology, geological survey equipment, robotics. However, there are problems with their use when working in real conditions (vibration, blows, acoustic effects, temperature change). The storage of high precision characteristics in a wide range of angular velocities under severe mechanical and temporal influences in our time is one of the main goals in the production of micromechanical gyroscopes.

The master's thesis is executed according to the main directions of scientific research of the department.

**The purpose of the master's thesis:** increase of accuracy and noise immunity of a micromechanical gyroscope RR-type under the influence of broadband vibration, minimization of influence of accelerations on the output signal.

**Task:**

1. Characterization of application areas of MMG.
2. An overview of the current state of development of micromechanical gauge speeds.
3. Description and comparative analysis of the influence of the main perturbing factors.
4. Description of the options of the control system of primary oscillations.
5. Detailed analysis of false deformations and deflections of a sensitive element under the influence of changes in temperature and vibration.

6. Description of the mathematical model.

7. Creating an Simulink Simulation Model. Study of the basic modes of operation for the ideal MMG, the influence of acceleration on the accuracy of the sensor. Investigation of the influence of the discrepancy between the frequencies of the inertial body and the moving elements.

8. Development of methods / techniques for reducing the impact of vibration. Simulation of proposed solutions.

**Object:** micromechanical gyroscope RR-type.

**Subject:** Improvement of precision and noise immunity of the micromechanical gyroscope of RR-type under the influence of broadband vibration, minimization of the effect of accelerations on the output signal.

**Research methods:** to solve the problem, a synchronous detector implemented in the Solid Works software to eliminate the high-frequency component of the secondary quantum MMG was used in the work.

**Scientific novelty:** algorithmic support with increased noise immunity for MM-type RR-type, which can also be used for stabilization and orientation systems, has been developed.

**Practical significance:** the algorithmic support with a raised impedance for MMG RR-type, which can also be used for stabilization and orientation systems, has been developed.

**Approbation of the results of the dissertation (presentations at scientific and technical conferences):**

1. XI All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Students and Postgraduates "A View to the Future of Instrumentation", Kyiv, 2018.

### **Bibliographic references**

Yarema AD Analysis of the construction of micromechanical gyroscopes in relation to the effect of accelerations / A. Yarema // XI All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Students and Postgraduates "A View to the Future of Instrumentation" - Kyiv, 2018.-p.67

**Key words:** inertial system, micromechanical gyroscope, enhancement of accuracy, inertial body, angular velocity, moving electrode, acceleration, vibration.

## ЗМІСТ

РЕФЕРАТ.....	4
ABSTRACT.....	7
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕР- МІНІВ .....	12
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ .....	13
1.1  MEMC технології.....	13
1.2  Мікромеханічні гіроскопи (ММГ) .....	17
1.3  Побудова та види ММГ .....	19
1.3.1  Мікрогіроскопи RR-типу.....	23
1.3.2  Мікрогіроскопи LL- типу .....	24
1.3.3  Мікрогіроскопи LR- типу .....	25
1.4  Стан розробок мікромеханічних гіроскопів.....	26
1.5  Класифікація дестабілізуючих впливів в мікрогіроскопах .....	28
1.5.1  Технологічні дефекти .....	29
1.5.2  Температурні впливи .....	30
1.5.3  Механічні дії .....	31
1.6  Висновки по розділу 1 .....	33
РОЗДІЛ 2. Аналіз та вибір методів підвищення точності та завадостій- кості ММГ .....	34
2.1  Класифікація методів підвищення стійкості ММГ .....	34
2.1.1  Структурно-конструктивні методи підвищення стійкості ...	35
2.1.2  Алгоритмічні або схемотехнічні методи підвищення вібро- і ударстійкості .....	43
2.2  Механічно пов'язані осцилятори .....	45
2.3  Механічно не зв'язні осцилятори .....	47



2.4 Контактні взаємодії при навантаженнях в напрямку, перпендикулярному площині інерційного тіла .....	48
2.5 Висновки по розділу 2 .....	52
РОЗДІЛ 3. ІМІТАЦІЙНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ МІКРОМЕХАНІЧНОГО ГІРОСКОПА НА ВІБРУЮЧІЙ ОСНОВІ .....	53
3.1 Опис моделі.....	57
3.2 Проведення досліджень ідеальної роботи ММГ з рухомими електрорадами.....	59
3.3 Висновки по розділу 3 .....	81
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ .....	83
4.1 Опис ідеї проекту.....	83
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту .....	85
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	85
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту .....	91
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	93
4.6 Висновки по розділу 3.....	96
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	97
ДОДАТКИ .....	105
Додаток 1 М-файл одномасного ММГ .....	106
Додаток 2 М-файл двомасного ММГ .....	111
Додаток 3 Бібліографічне посилання .....	117

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

МЕМС – мікроелектромеханічні системи

ММГ – мікромеханічний гіроскоп

ІНС – інерційна навігаційна система

ІМ – інерційна маса

РР – режим руху

РЧ – режим чутливості

ЧЕ – чутливий елемент

КР – кільцевий резонатор

ПП – пружний підвіс

СУ – система управління

## РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ

### 1.1 MEMC технології

Розробка перспективних систем навігації й керування рухом об'єктів різного призначення пов'язана з мініатюризацією систем, зниження їхньої вартості, енергоспоживання й експлуатаційних витрат.

Вимоги до зменшення масо-габаритних характеристик, енергоспоживання, вартості, породили роботи по створенню мініатюрних кремнієвих інерційних датчиків. За основу було прийнято використання обладнання, яке застосовується в мікроелектроніці, що відкрило шлях до створення надмініатюрних електромеханічних систем. Цей новий напрям в області приладобудування отримав назву MEMC технології [1].

Недосконалість застосованих при виробництві MEMC систем технологій приводить до виникнення ряду відхилень, порушень, дефектів в структурі MEMC пристроїв.

Пошук нових можливостей створення інерційних датчиків з необхідними характеристиками й прогрес в області мікроелектроніки привели до появи нового класу приладів – мікромеханічних гіроскопів (ММГ), найбільш складних MEMC пристроїв. У цей час питання створення й використання ММГ привертає все більшу увагу розроблювачів і споживачів малогабаритних датчиків параметрів руху. У даний час відомо більше ста різних явищ і фізичних принципів, які дозволяють вирішувати гіроскопічні завдання.

Мікромеханічні гіроскопи - третє з самих затребуваних застосувань в мікроелектромеханічній (MEMC) індустрії інтегральних датчиків за обсягами продажів (після акселерометрів і датчиків тиску). Затребуваність гіроскопів підтримується багатьма ринками - клієнтським, медичним, промисловим і військовим.

Таким чином, мікроелектромеханічні пристрої являють собою системи, в яких на поверхні або в об'ємі твердого тіла інтегровані електричні та мікро-механічні структури [2, 3, 4]. Завдання, що виникають при проектуванні мікро-механічних гіроскопів, вимагають спільного рішення проблем механіки, електроніки, метрології, технології, матеріалознавства. Виникаючі похибки гіроскопа зумовлені низкою причин цих областей.

Сучасні ММГ значно уступають по точності традиційним електромеханічним гіроскопам, але мають переваги по масогабаритних характеристикам, показникам собівартості й енергоспоживанню. Розроблювані зразки ММГ характеризуються надмалою масою (частки грамів) і габаритами (одиниці міліметрів), низькою собівартістю (десятки USD на одну вісь вимірювань) і енергоспоживанням, високою стійкістю до механічного (ударні впливи до 105g) і теплового впливу (від -40 до +85), задовільною точністю.

Як досягнення є відомості про те, що на імітаційному макеті в ЦНИИ-Маш вдалося отримати дрейф близько 200 кут.град/год, а в планах московського АП «Вектор» - 0,1 кут.град/год. Американська «Draper Laboratory» планує випуск ММГ з дрейфом менше 1 кут.град/год. При цьому робиться висновок про те, що або ММГ витісняє малогабаритні гіроскопи, або ММГ будуть використовуватися в дешевих і грубих системах орієнтації.

Основні переваги МЕМС визначили області застосування, в яких вони до теперішнього часу отримали найбільш широке поширення. Це ті області, в яких потрібні або прості, але мініатюрні і повторювані вироби при досить великих обсягах випуску і обмеженнях на вартість кінцевого виробу, або складні спеціалізовані високоточні, надмініатюрні і високонадійні вироби. Серед можливих областей застосування ММГ, як датчиків параметрів руху можна назвати: автомобільна промисловість, навігаційне устаткування, військова техніка, робототехніка, медицина і т. д.

Тенденція до використання мікромеханічних гіроскопів, хоча вони працюють не так довго як класичні і менш точні, пояснюється багатьма факторами, один з яких – висока стійкість до зовнішніх впливів. Наприклад, при випробуваннях одного з продуктів, вироблених при співпраці Санкт-Петербурзького Державного Політехнічного Університету, після руйнування снаряда виявилось, що гіроскоп продовжував функціонувати. Тобто при випробуваннях він витримав навантаження 3000g. Один з основних показників надійності – довговічність.

Розробками ММГ почали займатися з 1990-х років в ряді ведучих закордонних лабораторій та інститутів. У наш час цим займаються фірми, такі як Analog Devices, Boeing North American, Rockwell International Corporation, Northrop Grumman Corporation, Litton Systems, Motorola, Integrated Micro Instruments, Charles Stark Draper Laboratory, корпорація SAGEM ( Франція), ЦНИИ « Электроприбор», НИИ « Полюс», ЗАО « Гирооптика».

На окрему увагу заслуговує застосування мікромеханічних датчиків у виробках військової техніки. У цій області мікромеханічні датчики вирішують завдання управління:

- мобільними маніпуляторами, оснащеними зброєю або іншими необхідними засобами;
- безпілотними літальними апаратами;
- ракетно-артилерійськими боєприпасами.

Зараз гіроскопи все більше використовуються в цивільній продукції (мобільні телефони, автомобілі), в автомобільній промисловості (системи безпеки, навігаційні системи, контроль динаміки автомобіля ESC і ABS), робототехніці, системах стабілізації різних об'єктів від безпілотних літальних апаратів до відеокамер. Найбільшим споживачем ММГ є автомобільна промисловість.

Ключові автомобільні застосування, для яких розробляються нові гіроскопи, це:

- 1) виявлення крену машини і бічних перекидань (Rollover);
- 2) навігаційні системи;
- 3) контроль динаміки автомобіля ESC, а також ABS.

Гіроскопи можуть застосовуватися, наприклад, і для коригування висоти і стабільності підвіски в залежності від кутової швидкості крену автомобіля.

Так для мобільних телефонів з вбудованими фотокамерами розробники вбачають основну сферу застосування мікрогіроскопів, в якості стабілізаторів зображення, здатних компенсувати тремтіння руки під час зйомки. Завдяки використанню технології MEMS, сенсор дуже компактний в своїх розмірах (6х6 мм), а також має низькі енергоспоживання і собівартість, що особливо критично для мобільних телефонів.

Згідно з дослідженнями вчених з університету Ньюкасла, мініатюрні вібраційні гіроскопи, давно застосовуються в навігаційних приладах, можуть використовуватися як надчутливі біосенсиори, здатні швидко і ефективно виявляти ракові клітини. Новий гіроскопічний біосенсор може також застосовуватися для діагностики та лікування ряду інших захворювань, включаючи інфекційні.

Інерційні навігаційні системи (ІНС) забезпечують високу короточасну точність оцінки місця розташування, орієнтації і швидкості. Оскільки зі збільшенням точності інерційних датчиків значно зростають у ціні, їх застосування протягом довгого часу обмежувалося високопрецизійними областями, такими як космічна та авіаційна навігація. З появою інерційних датчиків на основі MEMS інерційні навігаційні системи стають доступними для багатьох інших областей, що пояснюється такими перевагами, як швидко зростаюча точність, швидкодія і низька ціна. Однак використання таких ІНС, в якості автономної навігаційної системи обмежена швидкістю наростання помилок ІНС через помилки інерційних датчиків [5].

Інтегрування в одну систему радіонавігаційних і мікромеханічних датчиків дозволяє досягти значно кращих якісних показників. Таким чином, можна компенсувати помилки мікромеханічних перетворювачів, помилки початкової виставки і помилки вихідної географічної інформації. Це призводить до необхідної точності визначення параметрів орієнтації і координат рухомих об'єктів: аерокосмічних літальних апаратів, морських суден, наземних транспортних засобів, робототехнічних комплексів, всіх видів об'єктів озброєння і військової техніки.

## 1.2 Мікромеханічні гіроскопи

Одним з найважливіших досягнень технологій мікроелектромеханічних (МЕМС) можна вважати створення мікроелектромеханічного гіроскопа (Рисунок 1.1)

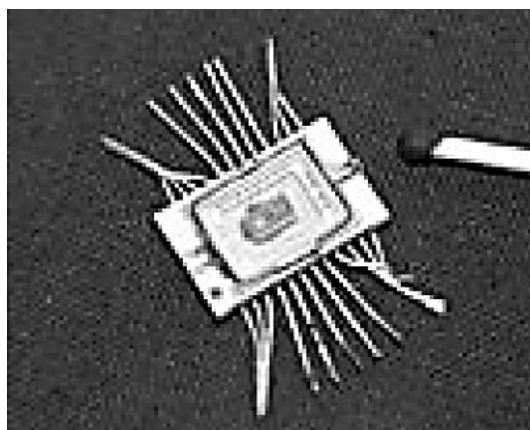


Рисунок 1.1 – Мікромеханічний гіроскоп

Дуже часто зловживають використанням приставки «мікро», наприклад, для термінів типу мікродатчик, мікроконтролер, мікродвигун. Габаритні розміри таких пристроїв цілком відповідають макросвіту і складають десятки міліметрів, а маса - сотні грам. При зазначених масогабаритних параметрах такі вироби, як гіроскопи, ніхто не називає мікроприладами, це просто мало-

габаритні вироби. В даний час, наприклад, до мікрогіроскопів відносять об'єкти, у яких габаритні розміри - одиниці міліметрів, а маса - одиниці і десятки грам [6].

Забезпечення високої чутливості - одна з основних задач при розробці навігаційних інерціальних приладів, наприклад, ММГ. Проблеми створення мікромеханічних гіроскопів багатогранні. Найважливішими і найбільш складними є завдання точного зйому інформації в ММГ. Воно полягає у вимірюванні за допомогою ємнісних датчиків дуже малих амплітуд кутів чи переміщень вторинних коливань, які несуть інформацію про вимірювану кутову швидкість. Підвищення точності ММГ дозволить використовувати їх у нових областях цивільної та військової техніки, зокрема, для забезпечення навігації і управління малими рухомими об'єктами. Прикладами таких об'єктів є безпілотні літальні. Розширення областей застосування ММГ висуває в першу чергу нові проблеми конструкторсько-технологічного характеру. До них відносяться:

- побудова розрахункової схеми;
- оптимізація параметрів конструкції, забезпечення відношення між власними коливаннями та іншими існуючими формами коливання;
- підбір матеріалів з необхідними фізичними характеристиками;
- досягнення мінімального порогу чутливості;
- забезпечення міцності конструкції в процесі експлуатації;
- пошук способів зменшення впливу технологічних, температурних та інших факторів на точність і стабільність характеристик приладу.

Однією з основних проблем при розробці конструкції пружних підвісів є забезпечення лінійності характеристик жорсткості по вісях первинних та вторинних коливань. Параметри гіроскопа вибирають таким чином, щоб частота вимушених коливань в режимі руху збігалася з частотою власних коливань



ММГ в режимі чутливості. Такий режим роботи відповідає резонансному налаштуванню ММГ. Можливе розбалансування частот різних режимів. У конструкції використовують високодобротні матеріали, що володіють низькими внутрішніми втратами на тертя.

В умовах експлуатації передбачається наявність інтенсивних інерційних впливів – високочастотні вібрації та удари, тому при проектуванні пружного підвісу слід враховувати моменти сил пружності, що виникають при деформації конструкції в умовах вібрації.

Конструкції ММГ повинні мати власні частоти, більші частотного діапазону вібрації, та витримувати ударні впливи величиною в десятки тисяч  $g$ , малу масу інерційного тіла і високу частоту коливань підвісу ( на рівні кілогерц).

### **1.3 Побудова та види ММГ**

ММГ є різновидом інерційних сенсорів, які використовуються для вимірювання кутової швидкості обертання об'єкта. Мікромеханічні гіроскопи містять в собі механічну та електронну частину, які можуть встановлюватися як на одному чіпі [8, 9], так і бути в роздільних корпусах.

Перший мікромеханічний гіроскоп був описаний в лабораторії Драйпера в 1988 [10], потім почали швидко з'являтися інші типи мікрогіроскопів, таких як мікромеханічний вібраційний гіроскоп, п'єзоелектричний вібраційний гіроскоп, гіроскопи на поверхневих і об'ємних акустичних хвилях, мікрогіроскопи на електростатичних і електромагнітних підвісах, мікрооптоволоконні, мікропідинні, мікроатомні гіроскопи та інші. Вони відрізняються один від одного принципами роботи, структурою, принципом виготовлення і використовуваними технологіями [11, 12]. Детально різні типи мікрогіроскопов представлені в статтях [13, 14, 15].

Для того щоб гіроскоп міг вимірювати кутову швидкість повороту об'єкта, необхідно в ньому створити вібраційний (лінійний або кутовий) рух інерційного тіла (первинні коливання). Таким чином, до складу гіроскопа обов'язково входить збудник первинних коливань - мікроактюатор. Інерційне тіло може мати форму камертона, балки, диска, пружного кільця тощо. У більшості випадків для створення первинних коливань використовується електростатичний вібропривід. За принципом перетворення ММГ діляться на: ММГ прямого перетворення і ММГ компенсаційного типу (зі зворотним зв'язком).

Схеми побудови більшості ММГ базуються на принципі роботи осциляторного вібраційного гіроскопа. До інерційної маси, що має пружний зв'язок з основою, прикладаються сили  $F_B$  ( або моменти  $M_B$ ) і збуджуються гармонійні коливання (лінійні або кутові) постійної амплітуди й частоти. При обертанні основи з переносною кутовою швидкістю  $\omega$  виникають сили Коріоліса, що діють на інерційну масу й створюють тиск на пружний зв'язок інерційної маси з основою. Ці сили викликають коливання маси в напрямку, що перпендикулярний її відносній швидкості й переносній кутовій швидкості. Амплітуда виникаючих коливань є мірою вимірюваної кутової швидкості.

Як і класичний, ММГ має всі основні елементи: ротор, опори головної осі та осі прецесії, датчик кута, датчик моменту, гірокамеру, керуючу електроніку.

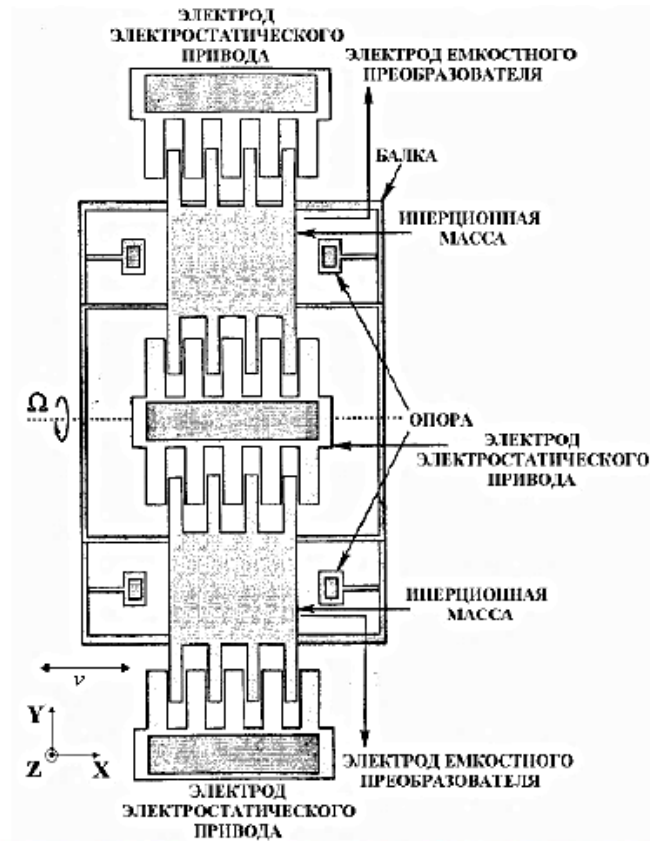


Рисунок 1.2 – Мікромеханічний гіроскоп з однією віссю чутливості

Конструктивним вузлом, що визначає функціональні можливості мікрогіроскопа, є чутливий елемент. Чутливий елемент мікрогіроскопа можна назвати інерційною масою в підвісі з приводом, що забезпечує режим руху, на який при наявності переносної кутової швидкості внаслідок виникаючого прискорення Коріоліса і відповідних йому сил інерції, генеруються вторинні коливання (режим чутливості). На основі цього мікрогіроскопи іноді називають приладами для вимірювання прискорення Коріоліса. Мікромеханічні гіроскопи за видами руху інерційних мас поділяються на: LL-, LR-, RR-типу:

- 1) ММГ RR (rotare-rotare) типу - обидві форми коливань є кутовими.
- 2) ММГ LL (linear-linear) типу - обидві форми коливань є лінійними.
- 3) ММГ LR (RL) типу - поєднання кутової і лінійної форм коливань ротора.

Кожен вид ММГ характеризується набором класифікаційних ознак, найважливішими з яких є наступні:

1. Число вимірювальних осей (можуть вимірювати кутові швидкості за однією або двома координатними вісями).
2. Число інерційних мас (одномасові та багато масові (дві і більше ІМ)).
3. Тип підвісу (механічні (контактні) і неконтактні (можуть називатися по фізичному принципу його роботи)).
4. Наявність кінематичних зв'язків (необхідні для підтримування постійних частот і амплітуд коливань ІМ).
5. Форма переміщення ІМ.
6. Тип датчика зйому сигналу (прямі перетворювачі) - у ММГ можуть використовуватися будь-які типи прямих перетворювачів (магнітоелектричні, електростатичні, п'єзореzystивні, оптичні та ін.).
7. Тип приводу (зворотні перетворювачі) - у ММГ можуть використовуватися будь-які типи зворотних перетворювачів (магнітоелектричні, електромагнітні, п'єзоелектричні).

Первинні коливання називають також режимом руху (РР), або рухом по координаті збудження, а вторинні - режимом чутливості (РЧ) - рухом по координаті вихідного сигналу) [8].

Всі мікромеханічні гіроскопи за своїм принципом функціонування є вібраційними. Вібраційні ММГ відрізняються від інших складністю їх функціонування. Інформаційний сигнал не формується на виході пристрою без механічного збудження інерційних мас. Для отримання інформаційного сигналу, необхідно привести інерційні маси в коливальний лінійний або кутовий рух. Сигнал дуже малий, тому потрібно механічне посилення його в формі поєднання частот збудження коливань і резонансної частоти коливань інерційної маси гіроскопа.

Основним матеріалом, що використовується в мікромеханічних гіроскопах, є кремній. Він успішно застосовується в мікроелектронній промисловості і буде надалі застосовуватись в областях МЕМС по ряду причин: кремній

поширений, недорогий, здатен осаджуватись тонкими плівками, висока чіткість та відтворення кремнієвих пристроїв при використанні фотолітографії, кремнієва підкладка може містити велику кількість ідентичних чіпів. Кристалічний кремній має темно-сірий колір і володіє наступними фізичними властивостями, приведеними в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Фізичні властивості кремнію

Фізична величина	Значення
Кристалічна структура	Алмаз
Щільність атомів, ат/м <sup>3</sup>	5,434,96*10 <sup>28</sup>
Кількість атомів/м <sup>3</sup>	5,0*10 <sup>28</sup>
Температура плавлення °C	1412-1415
Коефіцієнт теплопровідності, Вт (м <sup>2</sup> *K)	142-150

### 1.3.1 Мікрогіроскопи RR- типу

Даний тип ММГ ще називають також мікрогіроскопом у карданному підвісі. У цих гіроскопах в карданному підвісі реалізований пружний карданний підвіс чутливого елемента (ЧЕ). У першому варіанті ММГ використовується зовнішній пружний двухрамковий карданний підвіс ІМ, розташований симетрично відносно площини механічної структури. Навколо осі внутрішньої рамки за допомогою електростатичного вібраційного двигуна, реалізованого у вигляді пари електродів, розташованих на діелектричній підкладці під внутрішньою рамкою, створюється змінний кінетичний момент. При появі вимірюваної кутової швидкості, перпендикулярній площині механічної структури підвісу, виникає змінний гіроскопічний момент, що приводить до коливань зовнішньої рамки. Амплітуда цих коливань пропорційна вимірюваній кутовій швидкості. Знімання коливань здійснюється за допомогою ємнісного датчика,

пара електродів якого розташована під зовнішньою рамкою. Досягнута величина випадкового дрейфу гіроскопів становить 5 град/год.

### 1.3.2 Мікрогіроскопи LL – типу

В основу конструктивної схеми ММГ покладений виконаний з полікристалічного кремнію пружний підвіс ЧЕ з двома поступальними ступенями свободи в площині підвісу. У конструкції гіроскопа використовуються два незалежних пружних підвісу двох ЧЕ на одній підкладці, збуджуваних за допомогою гребінчастого електростатичного вібраційного двигуна і об'єднаних диференціальною системою ємнісного зйому, створеної кожним ЧЕ його системою гребінчастих електродів ємнісного датчика і системою електродів, розташованих на підкладці. Така конструкція ММГ забезпечує зниження похибки гіроскопа від лінійних прискорень, а також від ударів та лінійних вібрацій основи. Перевагою цього ММГ є його висока захищеність від лінійних перевантажень, вібрацій і ударів, що забезпечується повітряним демпфуванням у підвісі і диференціальними структурами підвісу та системи зйому.

Інша важлива перевага - розташування сервісної електроніки в інтегральному виконанні на одній підкладці з механічною структурою в одному чіпі, що істотно знижує рівень паразитних і шумових сигналів у системі зйому. Як перевагу ММГ слід також відзначити відсутність необхідності забезпечення вакууму в корпусі гіроскопа. Величина випадкового дрейфу складає  $\sim 0,3$  град/с.

Гіроскоп LL-типу (гіроскоп з кільцевих резонатором (КР)). У цьому гіроскопі в ЧЕ використовується КР. Перевагою подібних МГ є їх стійкість до зовнішніх механічних впливів, що забезпечується симетрією конструкції КР і його підвісу. Конструкція забезпечує мінімізацію впливу паразитних ступенів свободи, а також температурну стабільність власної частоти резонатора і його

добротності. У відомих МГ з КР, як правило, реалізується схема компенсаційного типу. Випадковий дрейф гіроскопа становить величину порядку 0,2 град/с.

### 1.3.3 Мікрогіроскопи LR – типу

Конструкція ММГ камертоного типу представлена на Рисунок. 1. 3. Вимушений рух ЧЕ, який забезпечує вібраційний двигун, є поступальним; інший рух, що є інформаційним - обертовий. Конструкція виконана з монокристалічного кремнію і являє собою камертон, реалізований у вигляді двох інерційних мас 1, закріплених за допомогою пружних елементів 2 у зовнішній рамці 3 (Рисунок. 1.3). Рамка пов'язана з основою через пружні елементи 4, що забезпечують їй обертовий рух навколо осі 2.

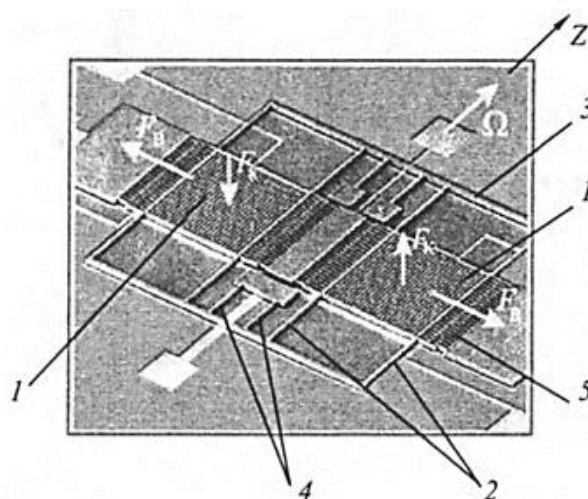


Рисунок 1.3 - Конструкція гіроскопа LR-типу

За допомогою електростатичного вібраційного двигуна збуджуються протифазні поступальні коливання мас. При наявності кутової швидкості основи  $\Omega$ , вектор якої збігається з вимірювальною віссю 2 обертання рамки, виникають сили Коріоліса, які створюють змінний момент, що приводить до кутових коливань рамки навколо осі 2 з частотою, рівною частоті двигуна. Амплітуда коливань рамки є мірою вимірюваною кутової швидкості. Вимірювання коливань рамки здійснюється за допомогою ємнісного датчика, електроди

якого розташовані на підкладці під інерційними масами. Одна з основних похибок ММГ - квадратурна, яка породжується вібраційним двигуном внаслідок не перпендикулярності осі збудження і вимірювальної осі.

#### **1.4 Стан розробок мікромеханічних гіроскопів**

Розробки ММГ ведуть ряд провідних закордонних фірм. У США – це корпорації Analog Devices, Boeing North American, Rockwell International Corporation, Northrop Grumman Corporation, Litton Systems і Motorola; університетські лабораторії CalTech і University of California. Фірмами, що спеціалізуються на створенні навігаційних систем на основі мікромеханічних елементів і приладів, є Integrated Micro Instruments і Charles Stark Draper Laboratory. В Японії мікромеханічні прилади розробляють корпорації: Murata Manufacturing, Fujitsu, Nippon Soken, Toyota, Matsushita Electric Industrial. У Великобританія провідною корпорацією в цьому напрямку є British Aerospace, в Південній Кореї - корпорація Samsung, в Німеччині - корпорації Robert Bosch і Siemens, у Франції - корпорація SAGEM.

У Росії проектування ММГ проводиться в ЦНДІ -Електроприбор, Раменським проектно-конструкторським бюро (РПКБ), НДІ "Полюс", НДІ "астрофізика", ЗАТ -Гірооптика, Московському державному інституті електронної техніки (МІЕТ), та інших. Кожна окрема фірма-виробник створює і використовує власну концепцію виробництва МЕМС. Перехід від класичних схем з обертовим ротором дозволяє усунути зі схеми приладу рухомі вузли, що мають найменшу надійність. Спрощення конструкції забезпечує повну її сумісність з технологіями мікроелектроніки.

Як правило, при виготовленні ММГ електромеханічні вузли формуються з монокристалічного кремнію за допомогою методів фотолітографії, анізотропного травлення, дифузійного зварювання та інших. Крім механічної частини в ММГ є елементи збудження коливань, датчики зйому і перетворення корисного сигналу, елементи формування зворотних зв'язків. Всі елементи



приладу є тривимірними структурами. Електростатичні, магнітоелектричні та електромагнітні ДС і ДМ застосовуються для збудження первинних коливань, а також створення компенсуючих сил і моментів.

На Рисунок 1. 4 представлено один з перших ММГ LR-типу, спроектований компанією Draper Laboratory. ЧЕ ММГ складається з двох ІМ. Ці ІМ прикріплені пружними елементами підвісу до анкерів, які в свою чергу кріпляться до підкладки. На ній розміщені статори електростатичних гребінчастих ДС і нерухомі електроди ємнісних датчиків положення (ДП). Рухомі електроди ДП розташовуються на ЧЕ. ІМ протифазно лінійно коливається вздовж осі X. При виникненні кутової швидкості  $\Omega$  навколо осі Y (вісь чутливості) на ІМ діятимуть коріолісові сили, ортогональні площині XY. Викликані даними силами кутові коливання рамки і ІМ вимірюються ємнісними ДП.

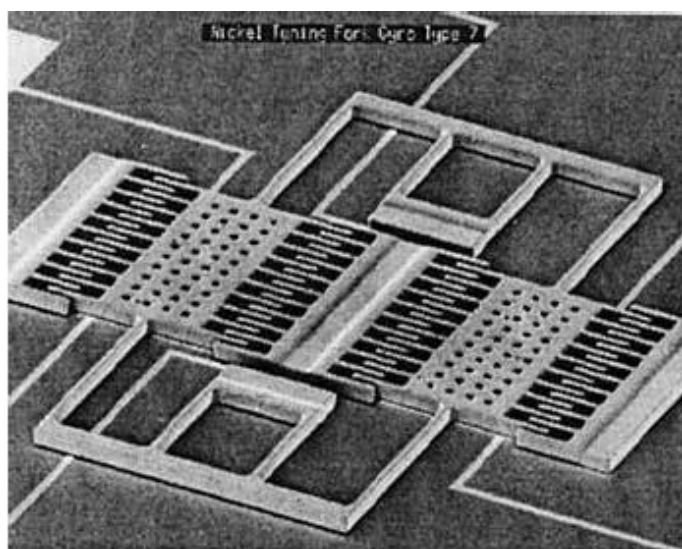


Рисунок 1.4 - Мікроструктура LR-гіроскопа Draper Laboratory

Гіроскоп ADXRS фірми Analog Devices є інтегральною мікросхемою, яка виконана на єдиному кристалі кремнію. Ця схема містить всі електронні компоненти, необхідні для формування аналогового вихідного сигналу. Дві ІМ ММГ знаходяться в центрі схеми. Електростатичні двигуни створюють коливання обох ІМ. Знімання сигналу, пропорційного кутовій швидкості, здійснюється гребінчастими ємнісними ДП. ММГ ADXRS150 і ADXRS300, серійно

випускаються компанією Analog Devices. Вони мають діапазон вимірювання  $150\text{ }^{\circ}\text{/с}$  і  $300\text{ }^{\circ}\text{/с}$ , відповідно.

Іншим напрямком в сучасних розробках ММГ є прилади з дисковими резонаторами, які здійснюють крутильні коливання, обертові вібраційні ММГ (BVMMГ) або ММГ RR-типу.

Мікромеханічні гіроскопи зазвичай працюють або в резонансному режимі, тобто при рівності частот первинних і вторинних коливань, або близько до резонансу, тому реакція системи дуже чутлива до зміни параметрів в умовах експлуатації при дії різних дестабілізуючих факторів: температури, прискорень, вібрації, ударів тощо [16, 17, 18, 19]. Коливання температури змінюють електромеханічні властивості мікрогіроскопів [20, 21, 22]. Технологічні можливості процесів виготовлення МЕМС ще недостатні порівняно з вимогами для виробництва високоефективних інерційних датчиків. Це викликає недоліки в механічній конструкції і обмежує стабільність та надійність ММГ [23, 24, 25, 26]. Недосконалості виготовлення також вносять перехресний зв'язок між осями первинних і вторинних коливань, який може бути навіть більше, ніж сигнал від сили Коріоліса.

У сучасних умовах, коли вирішені основні питання принципів побудови, конструювання та технології виготовлення мікромеханічних перетворювачів, інерційних модулів і БІНС на їх основі, на перший план виступає проблема підвищення точності перетворювачів і створення приладів навігаційного класу точності.

### **1.5 Класифікація дестабілізуючих впливів в мікрогіроскопах**

Похибка гіроскопу вимірюється швидкістю його уходу. Величина уходу, що також називається дрейфом, виявляється пропорційною моменту сил  $M$  відносно центру підвісу гіроскопа. Дрейф зазвичай вимірюється в кутових градусах в годину часу. Вільний гіроскоп функціонує ідеально лише в тому випадку, якщо зовнішній момент рівний нулю.

Важливими факторами, що впливають на точність мікромеханічних акселерометрів і гіроскопів, є такі фактори, як технологічні недосконалості виготовлення датчиків, механічні та температурні впливи, що мають складний детерміновано-випадковий характер, наявність рухомої основи, а також взаємодія і взаємовплив цих факторів.

До дестабілізуючих чинників також потрібно віднести електростатичні взаємодії, до яких відносяться різні паразитні ємнісні і індуктивні зв'язки. При подачі на ємнісні електроди сенсора напруги між ними виникають сили електростатичної взаємодії, що призводить до зміни сумарної жорсткості по осях підвісу і зміні резонансних характеристик ММГ. При збільшенні напруги і зменшенні зазору між електродами може виникати неконтрольоване тяжіння і «схлопування» електродів [27, 28].

Модулі МЕМС з точки зору радіаційної стійкості є унікальними виробами, оскільки містять в собі мікроелектронні і мікромеханічні структури, кожна з яких по-різному чутлива до радіаційного впливу, який призводить до деградації параметрів обох [29].

### **1.5.1 Технологічні дефекти**

При виробництві МЕМС з такими мікроскопічними розмірами неможливо гарантувати, що всі екземпляри чутливих елементів матимуть однакову форму і розміри. Зі зміною розмірів буде змінюватися маса і в більшій мірі коефіцієнти жорсткості пружних підвісів. Масштабний коефіцієнт ММГ залежить від жорсткості пружних підвісів [31, 32, 33], а так як ММГ працює при резонансному посиленні вихідного сигналу, то буде змінюватися масштабний коефіцієнт ММГ. Таким чином, технологічні похибки можна розглядати як дестабілізуючий фактор.

Джерелом похибок МЕМС є також залишкові напруги, що виникають в результаті з'єднання пластин при корпусуванні. Вплив технологічних дефектів на різні схеми ММГ розглянуто в роботах [34, 35, 36]. Інструментальні

похибки призводять до перекосу вимірювальних осей і, як наслідок, до перехресної чутливості сенсорів і появи квадратичної похибки в ММГ.

### 1.5.2 Температурні впливи

При дії температури виникають зміни лінійних розмірів конструкції, змінюються модулі пружності використовуваних матеріалів. Через різницю температурних коефіцієнтів лінійного розширення (ТКЛР), що з'єднуються і їх температурної залежності в конструкції виникають внутрішні механічні напруги, порушується геометрична форма [37]. Все це тягне за собою зміну частотних властивостей сенсора гіроскопа і появу похибок.

Велика кількість робіт направлено на пошук способів поліпшення температурних характеристик МЕМС гіроскопів. У роботі [38] аналізується вплив температури на динамічні характеристики ММГ. Це призводить до зміни масштабного коефіцієнта, дрейфу гіроскопа. Запропоновано два методи зменшення температурних похибок. Перший метод компенсації заснований на застосуванні нейронних мереж для побудови температурної моделі гіроскопа. Як показують експерименти, система температурної компенсації не може повністю компенсувати вплив температури на характеристики гіроскопа. Крім того, в різних ММГ їх температурні моделі різні. Тому запропонована система стабілізації температури всередині корпусу гіроскопа.

У роботі [39, 40, 41, 42, 43] досліджуються методи температурної компенсації масштабного коефіцієнта, показано, що він залежить від амплітуди первинних коливань і від різниці резонансних частот. Показано, що є часова затримка встановлення температури всередині корпусу МЕМС гіроскопа. При відсутності внутрішнього термометра пропонується використовувати резонансну частоту гіроскопа, як індикатор температури. Показано, що частота змінюється лінійно з температурою і може бути використана для корекції температурних похибок.

У роботі [42] розглянуто вплив температури на півсферичний резонатор гіроскопа. Отримано модель температурного дрейфу гіроскопа на основі зміни власних частот резонатора. Ця модель використовується для корекції вихідного сигналу гіроскопа, а не за рахунок стабілізації температури.

Таким чином, зміна робочої температури є дестабілізуючим фактором в мікроакселерометрах і ММГ, та залежить від схеми МЕМС.

### 1.5.3 Механічні дії

В умовах експлуатації на високошвидкісних і високоманеврених об'єктах ММГ піддаються інтенсивним ударним і вібраційним впливам, тому забезпечення стійкості при механічних впливах є вельми актуально. Необхідно передбачити заходи для підвищення їх механічної стійкості, які полягають:

- у виборі резонансних частот сенсорів;
- в розробці ударостійкого пружного підвісу;
- в раціональному розташуванні пружних елементів і їх місць кріплення;
- в установці обмежувачів переміщень елементів сенсора.

У літературі в основному розглядається вплив механічних дій на ММГ. Так, в роботі [44] розглянуті питання забезпечення стійкості ММГ в умовах наявності лінійної, кутової вібрації, ударів. При постійному прискоренні виникає зміщення нуля і зміна масштабного коефіцієнта. При лінійної і кутової вібрації можуть бути резонанси. В роботі проаналізовані методи механічної стійкості в ММГ зарубіжних фірм, які застосовують багатомасові сенсори, гіроскопи і акселерометри для компенсації, встановлюють блок гіроскопів і акселерометрів в антивібраційний і антиударний підвіси.

Вплив вібрації на ММГ RR -типу досліджено в роботі [45]. У гіроскопі враховані нелінійні ефекти і нерівність ємнісних характеристик датчиків кута

і моментів. При вібрації змінюються зазори і змінюються ємності. Для створення вібростійких ММГ необхідно на етапі складання здійснювати вирівнювання характеристик датчиків кута і моментів.

Вплив вібрації та ударів на мікрогіроскоп RR-типу розглянуто в роботах [48, 49, 50]. Ударні навантаження призводять до контактних взаємодій елементів конструкції. Спроектовані упори, які дозволяють підвищити переважувальну здатність підвісу.

Динаміка ММГ RR-типу при поступальних і кутових коливаннях основи досліджена в роботі [46]. Показано, що в гіроскопі можлива поява комбінаційних резонансів при частоті вібраційних впливів, що дорівнює різниці частот первинних і вторинних коливань, що робить прилад непрацездатним.

Існує велика різноманітність схемних рішень і реалізованих конструкцій. Кожна організація розвиває свій напрямок. Підвищення точності ММГ до тактичного рівня вимагає ретельного аналізу чутливості до вібраційних, ударних впливів і вироблення заходів щодо їх зниження для конкретних конструкцій мікрогіроскопів.

## 1.6 Висновок по розділу 1

Поява та вдосконалення МЕМС-технологій привело до появи ММГ, виконаних по даній технології. У зв'язку з чим, серед багатьох видів гіроскопів, найперспективнішими та швидко розвиваючими являються мікромеханічні. Вони мають надмалі масу і габарити, низьку собівартість і енергоспоживання, високу стійкість до механічного і температурного впливу. Характеристики механізму залежать від матеріалу виготовлення, основний матеріал для виготовлення мікромеханічних гіроскопів – кремній (поширений, недорогий, здатен осаджуватись тонкими плівками).

Розробки ММГ ведуть ряд провідних країн і надалі очікується підвищення попиту як на традиційні резонансні гіроскопи з найкращими робочими характеристиками – надійність, розміри, ціна, так і масова хвиля комерціалізації нових розробок на основі оптичних технологій МЕМС.

Основними завданнями, що стоять перед розробниками сучасних ММГ, – це забезпечення точності та працездатності ММГ в умовах агресивних зовнішніх впливів. У результаті проведеного огляду та аналізу видно, що актуальною є розробка нових схемних, конструктивних та алгоритмічних засобів, що здатні зменшити похибки ММГ при дії інтенсивного зовнішнього перевантаження, викликаного чи випадковою вібрацією, чи певними акустичними впливами середовища. У даній дисертації розв'язується завдання підвищення точності ММГ RR-типу при впливу прискорення.

## РОЗДІЛ 2. Аналіз та вибір методів підвищення точності та завадостійкості ММГ

### 2.1 Класифікація методів підвищення стійкості ММГ

Проведений аналіз існуючих і розроблюваних шляхів, методів і технічних рішень по підвищенню стійкості ММГ дозволяє розділити ці методи на структурно-конструктивні і алгоритмічні (Рисунок 2.1)

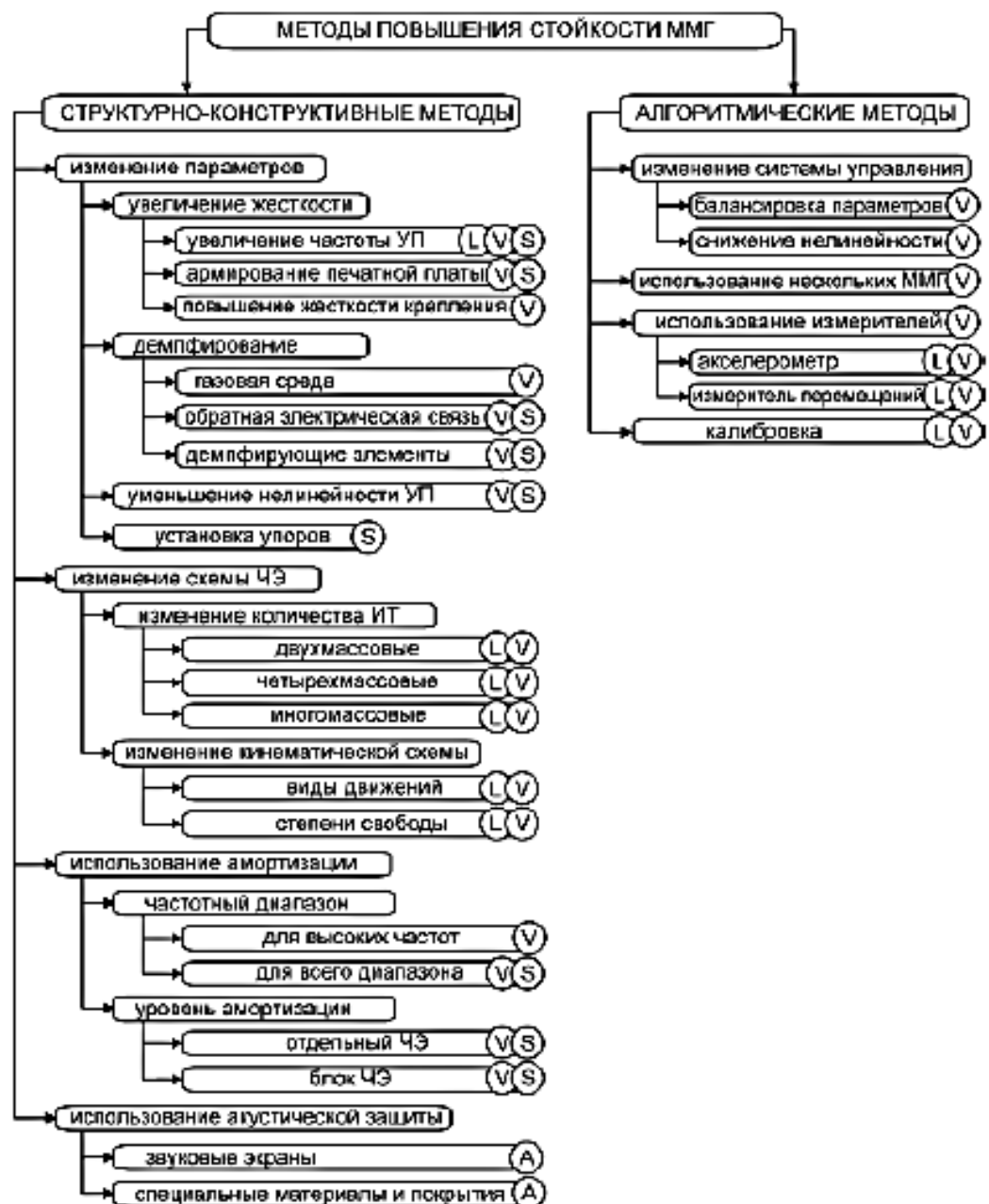


Рисунок 2.1 – Класифікаційна схема методів підвищення стійкості ММГ до механічних впливів



Класифікаційна ознака структурно-конструктивних методів описує рішення, реалізовані в ЧЕ ММГ або в приладі в цілому, у вигляді зміни параметрів приладу, модифікації схеми вимірювача, використання амортизації того чи іншого виду. Класифікаційна ознака алгоритмічних методів пов'язаний з розробкою процедур і схем перетворення сигналу в ЧЕ, з використанням декількох ЧЕ або додаткових вимірювачів для обробки сигналів в реальному часі.

Мається на увазі, що в процесі експлуатації ММГ піддаються впливу постійних або повільно мінливих лінійних прискорень, поступової і кутової вібрації, ударів, акустичного шуму [52, 53]. На Рисунку 2.1 наведені позначення методів підвищення стійкості, найбільш дієвих, на думку авторів, по відношенню до тих чи інших дій: «L» (linear acceleration) - методи, ефективні при постійних прискореннях основи; «V» (vibration) - при вібрації основи; «S» (shock) - при ударних навантаженнях; «A» (acoustic) - при акустичному шумі. Для підвищення стійкості ММГ до будь-яких механічних впливів необхідно використання комбінацій цілого комплексу заходів, заснованих на різних методах.

### **2.1.1 Структурно-конструктивні методи підвищення стійкості ММГ**

Зміна параметрів ЧЕ і його ПП представляє собою підклас структурно-конструктивних методів, пов'язаний з підвищенням жорсткості структури механічної системи «ІТ - установка поверхня ММГ», зі зниженням нелінійності ПП, з підвищенням демпфування для зниження амплітуд резонансних коливань, з обмеженням переміщень ІТ. При цьому приходять у взаємну суперечність вимоги міцності (забезпечення високої жорсткості) і ефективної амортизації впливів від вібрацій (зменшення жорсткості і збільшення демпфування).

Очевидним методом підвищення стійкості конструкції ММГ по відношенню до вібраційних впливів є підвищення жорсткості і власних частот ІТ на

УП по осі первинних коливань. У Таблиці 2.1 наведено дані по власних частотах коливань ІТ на ПП в ММГ різних виробників. Межі отримання високих власних частот ІТ на УП на рівні 30 кГц, мабуть, пояснюються технологічними можливостями реалізації елементів УП необхідної товщини внаслідок надмалих габаритів ММГ (гіроскоп ISZ-1215 має розміри 4x5x1 мм).

Таблиця 2.1. Власні частоти коливань ІТ на ПП в ММГ різних виробників

Фірма-виробник	Модель ММГ	Нища власна частота ІТ, кГц
InvenSense	ISZ-1215	30
Silicon Sensing	CRS09	28
STMicroelectronics	L2G2IS	20
Analog Devices	ADXRS646	17.5
	ADXRS150	14
Kionix	KGF01	10
SensoNor	SAR100 (ButterflyGyro™)	9,4
Melexis	MLX90609	8.2
ЦННІ «Електроприбор»	ММГ-ЭПТРОН	8
	ММГ-2	3

Підвищення нижчої власної частоти ІТ на ПП знижує амплітуду первинних коливань і, відповідно, зрушує вправо діапазон чутливості ММГ до вібрації [54, 53]. Слід враховувати, що при цьому зменшується коефіцієнт перетворення (чутливість) до вимірюваної кутовий швидкості (при збільшенні частоти УП в 2 рази чутливість ММГ до кутової швидкості знижується приблизно в 3,2 разів) і не усувається причина появи субгармонійних резонансів при вібрації [55].

При аналізі динамічних впливів, в першу чергу вібраційних, потрібно враховувати властивості всього ланцюга пружних елементів від джерела впливу до ІТ (Рисунок 2.2).

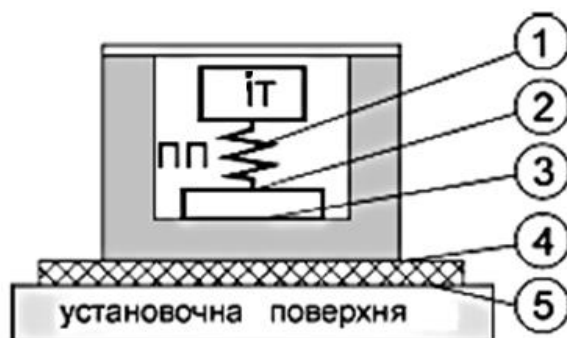


Рисунок 2.2 – Схема послідовного з'єднання в ЧЕ ММГ

1) ПП, що з'єднує ІТ і основу чіпа; 2) ПП до основи чіпа; 3) чіп в корпусі ММГ; 4) корпус ММГ на печатній платі; 5) печатна плата до установочної поверхні

У всіх випадках позначаються як самі елементи, так і з'єднуючі їх шари. Підвищення жорсткості структури досягається використанням досить жорстких високочастотних ПП (1), міцних з'єднань типу зварювання або паяння (2, 3, 4), друкованих плат з алюмінієвою основою (5, Рисунок. 2.3,а), збільшенням площі кріплення плати до настановної поверхні (5). Наприклад, на Рисунок 2.3,б показано кріплення круглої плати з ММГ в інерційному модулі, спроектованому в Лабораторії Ч. Дрейпера (США), як по периферії, так і в центрі [56]. При випробуваннях ММГ-ЕПТРОН найкращі результати досягнуті при фіксуванні клеєм по всій прилеглий поверхні плати [54].

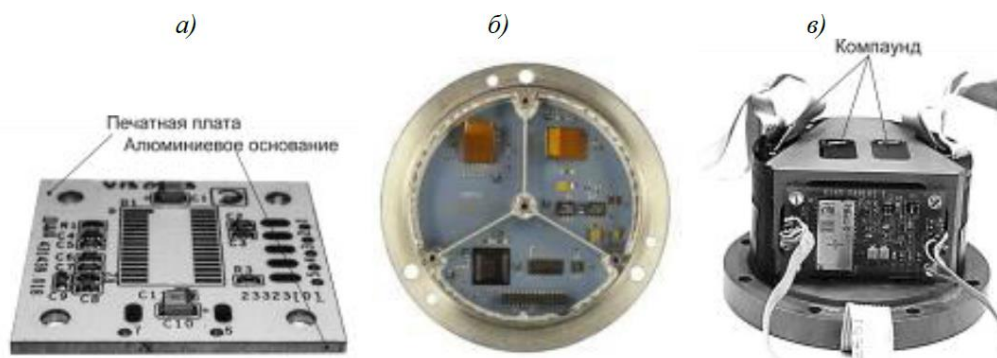


Рисунок 2.3 – Методи підвищення стійкості елементів структури «ІТ – установочна поверхня а) печатна плата на алюмінієвій основі; б) кріплення плати ММГ в інерційному модулі; в) заливка модуля ММГ-ЕПТРОН компаундом

Вище зазначалося, що коливальна система, утворювана ІТ на ПП, як правило, має високу добротність. Для зниження рівнів резонансних піків використовується демпфування, яке може бути реалізовано в ЧЕ заміною вакуумування внутрішньої порожнини на газове середовище, як в ММГ фірми Analog Devices (США), або шляхом формування каналу демпфування коливань ІТ у вигляді ланцюга зворотного електричного зв'язку [57]. Слід враховувати, що зниження добротності коливального контуру зменшує амплітуду вторинних коливань і чутливість до кутової швидкості. Однак це дозволяє знизити чутливість ММГ до впливу вібрацій і ударів. До того ж з використанням таких методів можна істотно знизити час відновлення працездатності ММГ після закінчення удару. Наприклад, прилад KGF01, в якому здійснюється демпфірування, після удару 500 g має час відновлення 0,25с, а для приладу ММГ-2 час відновлення після удару з піковим значенням 1200 g доходить до 5 с [58], що неприпустимо при використанні ММГ на швидко рухомих об'єктах.

В якості демпфуючих елементів для придушення коливань елементів конструкції модуля ММГ використовують заповнення внутрішніх порожнин зовнішніх корпусів компаундами або іншими пластичними сполучними складовими, що значно підвищує стійкість зібраного приладу до ударів і вібрацій (Рисунок 2.3,б). Основна складність застосування компаундів полягає в необхідності забезпечення їх достатньою теплопровідністю для виключення перегріву внутрішніх елементів.

Одним з ефективних методів підвищення вібро- і ударостійкості ММГ може бути використання в корпусах модулів демпфуючих (з високим внутрішнім тертям) сплавів. Сплави високого демпфування і високо-демпфуючі сталі, розроблені в ЦНІИЧермет ім. І.П. Бардіна на основі металевих систем Fe-Al і Fe-Cr, відрізняються високою демпфуючою здатністю при малих і середніх амплітудах знакозмінного навантаження і призначені для боротьби з шумами і вібраціями [59]. Використання таких сталей, а саме сталі 16ХЮ-МТБ-ВИ натомість сталі 12Х18Н10Т, в конструкції кронштейна модуля ММГ

дозволяє знизити амплітуду резонансних коливань при вібрації в 2-3 рази, а час відновлення після удару зменшити приблизно в 5 разів [60]. Демпфування може бути досить великим в пластмасах, проте більшість з них не володіє високою стабільністю форми і розмірів і при цьому зберігаються властивості в широких діапазонах зміни температур. У всіх випадках слід мати на увазі, що демпфуючі властивості матеріалів проявляються в більшій мірі, коли мають місце механічні напруги в конструкціях; при цьому, звичайно, потрібно враховувати вимоги забезпечення достатніх запасів міцності.

Відомо, що нелінійність ПП при первинних крутильних коливаннях ІТ обумовлена наявністю як згинальної жорсткості, так і жорсткості елементів на розтягнення-стиснення, що забезпечує появу нелінійної відновлюваної сили. Особливістю систем з нелінійної відновлювальної силою є поява кількох (звичай двох) стійких періодичних режимів з різними амплітудами автоколивального або вимушених коливань при зміні частоти в певних межах при можливості спонтанного переходу коливальної системи з одного режиму в інший без будь-яких додаткових зовнішніх впливів. Однак при вібраціях і ударах, в тому числі і про упори, істотно зростає можливість прояву зривів і стрибків амплітуд коливань ІТ, вібраційних зсувів нуля, нелінійного (демультиплікаційного) резонансу [61]. В даний час запропоновані і реалізовані способи зниження нелінійності УП за рахунок зміни конфігурації його елементів, при цьому коефіцієнт нелінійності знижується до 200 разів, що дозволяє підвищити стійкість ММГ до навантажень.

Для поліпшення властивостей вібро-і ударостійкості ЧЕ можна використовувати методи введення обмежень на переміщення ІТ в пружному підвісі за допомогою упорів, які вступають в дію тільки при достатньо великих переміщеннях. Це дозволяє зменшити амплітуду коливань ІТ при великих перевантаженнях, уникнути електричного замикання провідників рухомих і нерухомих електродів і знизити пікові значення механічних напруг в УП, що істотно підвищить запаси міцності ПП та вібро-і ударостійкість ММГ. Конструктивно

обмеження переміщень ІТ забезпечуються різними упорами, які поділяються на три види: жорсткі (жорсткість упорів істотно вище жорсткості ІТ і ПП), нелінійні (жорсткість нелінійно зростає в процесі зближення при контакті ІТ з упором) і лінійні м'які (упори з еластичним покриттям, деформації яких істотно впливають на зусилля). При контакті ІТ з упорами відбувається значна зміна напружено-деформованого стану як ПП, так і самого ІТ з втратою плоскої форми вигину останнього. Аналіз такого динамічного процесу деформування при контакті вимагає спеціальних методів розрахунку з використанням кінцево-елементного аналізу [62].

Структурні методи, пов'язані зі зміною схеми приладу і використовувані для підвищення стійкості гіроскопів, засновані на використанні в одному ММГ кількох ІТ для компенсації впливу інерційних навантажень (сил інерції) на рівні ЧЕ. Принцип роботи таких приладів заснований на використанні двох і більше ІТ, що здійснюють протифазні коливання, що дозволяє використовувати диференційний режим вимірювання і парировати дію інерційних прискорень [63]. Найбільш відомі реалізовані конструкції ММГ з двома ІТ (двомасових) - прилади фірми Analog Devices, наприклад ADXRS150 (LL тип), фірми Sensorog, наприклад SAR500 (RR-тип, Butter-flyGyro™) і камертонний гіроскоп TFG Draper Laboratory (L-R тип). У перерахованих гіроскопах ІТ розташовані в одній площині. При розташуванні ІТ друг над другом і при відповідному замиканні зворотних електричних зв'язків підвищуються можливості збільшення стійкості ММГ до лінійних прискорень, як запропоновано фірмою Robert Bosch GmbH. Для поліпшення показників стійкості використовують більшу кількість ІТ. Запатентовані рішення по реалізації ММГ з чотирма і більше ІТ, що мають кутові ступені свободи. У 2011 році фірма Analog Devices представила розробку нового чотиримасового ММГ ADXRS646 з пониженою чутливістю до лінійних прискорень і вібрації, що досягається використанням чотирьох ІТ з механічним зв'язком між ними.

Складність розробки багатомасових систем ММГ складається в необхідності з високою точністю забезпечувати рівність власних частот ІТ на ПП при відсутності механічного зв'язку між підвісами або певне відношення між частотами при її наявності. Забезпечення рівності частот для незв'язаних ІТ обмежено точністю технології фотолітографії, використовуваний при формоутворенні ПП та ІТ. Досягнє узгодження параметрів при існуючій точності виготовлення становить 1%; для більш високої точності необхідне використання спеціальних корегуючих засобів. При механічному зв'язку між ІТ в гіроскопі типу TFG для зниження чутливості до вібрації рекомендований метод рознесення частот синфазних і протифазних коливань ІТ в ПП.

Вібро-і ударостійкість ММГ в значній мірі визначається кінематикою рухів ІТ. У різних варіантах ІТ на ПП може здійснювати поступальні, кутові або комбіновані рухи по осях первинних і вторинних коливань. Особливо часто для ММГ зустрічається класифікація за ступенями свободи, умовно розділяються на схеми з поступальною ходою по координаті збудження і вимірювання (тип L-L), з кутовими рухами по обох координатах (тип R-R) і з різними комбінаціями поступальних і кутових рухів (тип L-R). Гіроскопи з поступальним рухом ІТ L-L типу за принципом побудови найбільш чутливі до поступальної вібрації, особливо в діапазонах власних частот. Тому в таких конструкціях власні частоти піднімають вище верхньої межі встановленого діапазону частот вібровипробування, що підвищує стійкість до прискорень, але знижує чутливість приладів до вимірюваної кутової швидкості. Гіроскопи R-R типу в ідеалі повинні бути нечутливі до поступальної вібрації, проте технологічні похибки, наявність нелінійностей, чутливість до кутових прискорень приводять до чутливості до перевантажень. Гіроскопи L-R типу мають як переваги, так і недоліки двох попередніх схем.

При неможливості або недостатній ефективності засобів підвищення вібростійкості на рівні ЧЕ використовуються методи зовнішньої механічної ізоляції від механічних впливів. Реалізуються такі методи шляхом створення

амортизуючих пристроїв різного виду. Це можуть бути найпростіші гумові або пластикові прокладки або оболонки, в яких розміщуються ММГ [10], спеціальні мікроплатформи з віброізоляторами, виконані на рівні вафлі, або віброударозахисні корпуси для всього інерціального модуля [39].

Залежно від способу виконання амортизація може забезпечувати віброзахист у всьому діапазоні частот (очевидно, з різною ефективністю в залежності від частоти вібрацій) або тільки на високих частотах, в діапазонах власних частот ІТ на УП. Вимоги до віброзахисту ММГ специфічні. Зважаючи на малість розмірів і внаслідок високих власних частот (кілогерци) амортизація може бути корисною, починаючи з частоти 1 кГц. Це означає, що система амортизації може мати досить високу жорсткість і забезпечувати тільки малі відносні вібропереміщення (кілька одиниць мікрометрів). До одних, спрощених типів амортизаторів можуть бути віднесені гумові прокладки, до інших - віброізолюючі платформи. Ефективність і можливість реалізації того чи іншого виду амортизації залежить від досягнень технології, алгоритму використання ММГ (окремий прилад або інерційний модуль), рівня і спектра зовнішніх вібраційних впливів.

**Акустичні впливи.** З аналізу результатів експериментальних досліджень випливає, що для забезпечення нормальної роботи ММГ в умовах потужних акустичних впливів потрібно значно знизився рівень звукового тиску безпосередньо на гіроскоп - в конструкції необхідно передбачати спеціальні звукозахисні екрани для ефективного захисту від акустичних впливів або використовувати спеціальні поглинаючі матеріали при корпусування датчика [42]. Альтернативним методом є збільшення власного частоти ПП вище частоти акустичних впливів з відповідним зниженням чутливості ММГ до кутової швидкості.



### **2.1.2 Алгоритмічні або схемотехнічні методи підвищення вібро- і ударостійкості**

Клас алгоритмічних методів підвищення стійкості заснований на використанні додаткових процедур перетворення сигналу в ЧЕ (див. Рисунок.2.1). Одним з методів підвищення стійкості ММГ до прискорення є модифікації його електронної системи управління (СУ). При вібраційних випробуваннях ММГ-2 було виявлено наявність субгармонійних резонансів в смузі частот до 2 кГц [58]. Більш докладні дослідження показали, що виникнення таких резонансів обумовлено нелінійністю характеристик датчиків кута і моменту і не ідентичністю параметрів (ємностей, площ, зазорів, напруг та ін.) в парах датчиків кута і моменту. При вимірюванні ємностей датчиків кута і моменту на етапі складання приладів і введенні додаткових ланцюгів в СУ можливе підвищення стійкості ММГ і придушення субгармонійних резонансів.

При використанні декількох ЧЕ в складі модуля ММГ для підвищення вібростійкості запропоновано використовувати метод мажоритарного вибору в якості алгоритму перетворення вихідного сигналу. За рахунок надлишкового числа однотипних ЧЕ, що володіють різною реакцією на вібраційний вплив, обирається сигнал того ММГ, у якого відсутній на виході помилковий сигнал високих рівнів внаслідок субгармонійних резонансів. Для того щоб помилкові сигнали при дії вібрацій на одній частоті не виникали одночасно на виході двох ММГ, власні частоти ІТ на ПП повинні відрізнятися не менш, ніж на 10%.

Для визначення реакції ММГ на вхідний інерційний вплив в цілях подальшої компенсації (коригування вихідного сигналу) ММГ може бути доповнений акселерометром або датчиком переміщень ІТ. У розширення можливостей згаданих методів можуть бути використані результати калібрування ЧЕ ММГ для визначення чутливості ММГ до постійних прискорень і до вібрації. Знання коефіцієнтів чутливості до прискорення при подальшій компенсації дозволить підвищити експлуатаційні характеристики ММГ при відповідній обробці вихідного сигналу. Застосування таких методів для усунення помилки

від високочастотної вібрації пов'язано з труднощами створення складної системи, забезпечуваній необхідні фазові співвідношення між сигналом перешкоди і сигналом акселерометра. Згідно з оцінками [64] подібні методи найбільш ефективні при компенсації впливу постійних або низькочастотних прискорень.

У даний час все більша увага приділяється розширенню областей застосування мікромеханічних гіроскопів (ММГ), що виготовляються на основі технологій мікроелектронної промисловості. Перспективно використання ММГ в системах автоматичного управління рухом високодинамічних об'єктів, для яких характерні підвищені динамічні перевантаження - високочастотні вібрації в широких діапазонах (в тому числі з частотами вище 2 кГц) і інтенсивні удари (з рівнями вище 100g).

Для підвищення коефіцієнта перетворення ММГ вигідно використовувати резонансне використання (зведення частот первинних  $\omega_1$  і вторинних  $\omega_2$  коливань інерційного тіла, диска), при цьому використовується висока добротність по осі вторинних коливань. Виходячи з вимоги підвищення коефіцієнта перетворення, бажано зниження власної частоти [65]. У той же час мінімальна чутливість ММГ до вібрації підстави має місце при значеннях власних частот осцилятора вище верхньої межі частотного спектра вібрації, що виключає виникнення резонансних явищ в конструкції приладу. Це призводить до протиріччя між досягненням максимальної чутливості приладу і забезпеченням нечутливості до вібрації основи.

Один із шляхів зниження чутливості ММГ до поступальної вібрації заключається у використанні тільки кутових коливань (Рисунок 2.4). Для ідеального приладу при відсутності технологічних похибок (статичного і динамічного дизбалансів) і при рівножорсткості пружного підвісу поступальна вібрація не впливає на показання приладу. *Проте, ММГ з кутовим осцилятором залишається чутливим до кутових вібрацій основи.*

Слід зазначити, що в технічних вимогах, як правило, регламентується вплив лінійної вібрації, при цьому факт існування кутовий вібрації ігнорується. Однак в дійсності мають місце і лінійні, і кутові коливання. За експериментальними даними, спектральна щільність випадкових вібрацій для певного класу об'єктів, на яких передбачається установка ММГ, має наступний порядок величин: рівень випадкової поступальної вібрації  $-0,1-10 \text{ мс}^{-2}\text{Гц}^{-1/2}$ , а рівень випадкової кутовий вібрації, корелятивною з поступальною, - близько  $10 \text{ с}^{-2}\text{Гц}^{-1/2}$  [66]. На частотах, що відповідають значенням власних частот первинних і вторинних коливань близько 3 кГц, амплітуди кутових вібрацій можуть становити 0,3 кутових секунд.

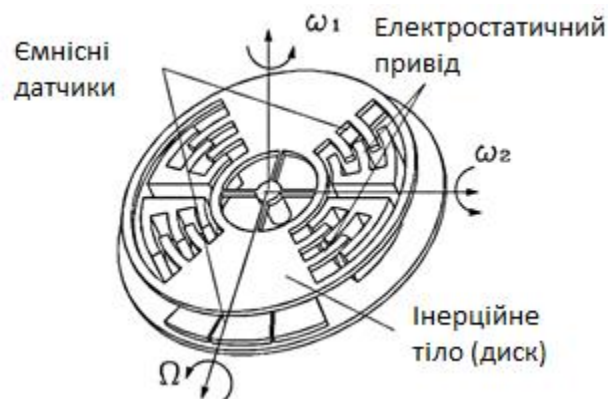


Рисунок 2.4 – Конструкція чутливого елемента ММГ:  $\omega_1$  і  $\omega_2$  – частоти первинних і вторинних коливань;  $\Omega$  - вимірювана кутова швидкість основи

## 2.2 Механічно пов'язані осцилятори

Усунення зазначеного протиріччя між підвищенням чутливості до вимірюваної кутової швидкості і зниженням чутливості до інерційних впливів основи внаслідок кутових коливань останнього може бути досягнуто використанням багатомасових систем ММГ. Відомі технічні рішення в основному відносяться до лінійних осциляторів, які містять два протифазно коливальних інерційних тіл у власних пружних підвісах з ідентичними частотними характеристиками. Зв'язок між тілами може здійснюватися з використанням додаткових пружних елементів, як в приладі компанії Litef (Німеччина), або з

використанням електричних контурів синхронізації, як в гіроскопах ADXRS фірми Analog Devices (США).

Відома конструкція ММГ з двома кутовими осциляторами, пов'язаними додатковим пружним елементом. Тут два кутових осцилятора (Рисунок 2.5) здійснюють протифазні первинні кутові коливання. При русі основи з кутовий швидкістю, вектор якої спрямований по осі чутливості приладу, інерційні тіла здійснювати протифазні вторинні коливання, а при кутових вібраціях підстави вторинні коливання осциляторів будуть синфазними. Авторами показано, що додатковий (з'єднувальний) пружний елемент повинен мати мінімальну жорсткість в протифазному русі і значну жорсткість в синфазному русі. Це дозволяє при певному включенні електродів ємнісних датчиків вимірювання вторинних коливань (Рисунок 2.5) отримати нечутливість ММГ до кутових прискорень підстави.

Переваги такої конструкції полягають в тому, що механічне з'єднання осциляторів за допомогою з'єднувального пружного елемента дозволяє створити пов'язану коливальну систему. Бажано, щоб в робочому автоколивальному режимі при протифазних первинних кутових коливаннях амплітуди обох інерційних тіл були рівні, тільки при цьому буде мати місце повна компенсація по відношенню до кутових коливань основи.

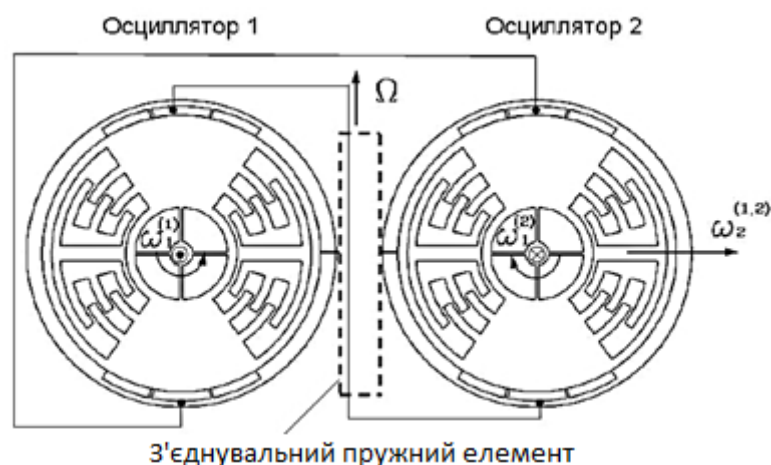


Рисунок 2.5 – Конструкція ММГ з двома кутовими осциляторами

З цього випливає, що при очевидності вимоги близькості парціальних частот доцільно вибирати такі форми з'єднувального пружного елемента, щоб він мав якомога більшу жорсткість при синфазних коливаннях при обмеженій жорсткості в протифазних. Таким чином, з'єднувальний елемент, як зазначено вище, повинен володіти певними пружними характеристиками і, крім того, забезпечувати необхідні пружні властивості в синфазних і протифазних первинних і вторинних коливаннях.

*Представлений підхід має суттєві обмеження в налаштуванні і забезпеченні необхідних властивостей чутливого елемента ММГ. Для забезпечення рівності амплітуд протифазних первинних коливань при наявності нерівності парціальних частот первинних коливань окремих осциляторів необхідні інші, спеціальні засоби.*

### **2.3 Механічно не зв'язані осцилятори**

Одним з варіантів, що розширюють можливості налаштування, є побудова ММГ на основі механічно не зв'язаних кутових осциляторів. При цьому зв'язок між осциляторами здійснюється тільки електрично. Для реалізації такої схеми необхідно забезпечити точну настройку первинних частот осциляторів і оцінити, в якому діапазоні може існувати розкид частот первинних коливань осциляторів.

Оцінка значущості технологічних похибок виготовлення різних пружних підвісів показує, що основний вплив на частоти первинних коливань надає ширина пружних елементів, і цей вплив на власну частоту оцінюється величиною приблизно 300-500 Гц/мкм. При досяжної точності виготовлення на рівні 0,2 мкм розкид частот складе близько 60-100 Гц. Для компенсації технологічних похибок виготовлення, призводять до розкиду власних частот, можуть бути використані різні пристрої, що створюють електричну жорсткість по осі первинних коливань, в тому числі:

- електростатичні двигуни первинних коливань, у яких зубці виконані з певним нахилом по відношенню один до одного. Це дозволяє створювати додаткові сили для регулювання частоти первинних коливань;

- неспіввісні електроди, центр яких не збігається з центром обертання інерційного тіла в пружному підвісі;

- додаткові плоскі електроди, розташовані, наприклад, уздовж пружних елементів підвісу для створення додаткової електричної жорсткості навколо осі первинних коливань (Рисунок 2.6). Така система аналогічна системі електричної жорсткості для регулювання частоти вторинних коливань.

*Використання багатомасових систем дозволяє підвищити вібростійкість ММГ для застосування їх в якості датчиків кутової швидкості високодинамічних об'єктів.*

## **2.4 Контактні взаємодії при навантаженнях в напрямку, перпендикулярному площині інерційного тіла**

На послідовних етапах розробки для різних модифікацій конструкцій підвісу розробниками пропонувалися і реалізовувалися засоби обмеження пружних переміщень ІТ, які вирішують завдання зниження механічних напруг і відсутності електричних контактів між електродами. Ряд варіантів засобів обмеження переміщень було запропоновано і запатентовано за кордоном, але, наскільки відомо, розташування упорів призначалося без обґрунтування, а серйозний аналіз і розрахунки ефективності не проводилися.

Відомі такі обмежувачі-упори переміщень: на підставі (Рисунок 2.6, а) [4]; вигину пружних елементів (Рисунок 2.6, б) [8]; амплітуди первинних коливань (Рисунок 2.6, в) [9]. Обмежувачі-упори перших двох груп, як правило, обмежують як кутові, так і лінійні переміщення ІТ, щоб при великих перевантаженнях не відбувалося замикань електричних контактів. Вони можуть бути виконані у вигляді коротких штирів на статорі, що входять з гарантованими зазорами порядку кілька мікро-метрів в прорізи ІТ (Рисунок 2.6, а), а можуть

бути розташовані поза ІТ (Рисунок 2.6, в). Такі упори практично не обмежують переміщення по осі  $X$ , але в режимі первинних кутових коливань при додаванні переміщень при цих коливаннях і поступальних переміщень при дії лінійних прискорень вступають в силу обмеження, обумовлені можливістю зіткнень упорів з межами прорізів.

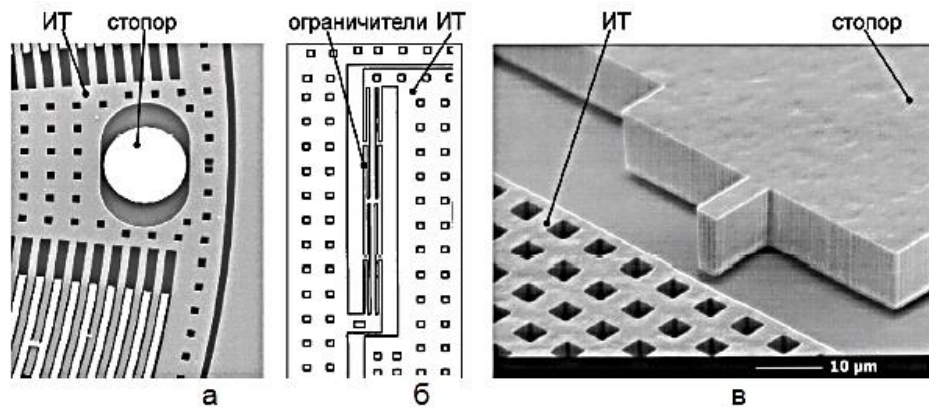


Рисунок 2.6 – Упори на основі (а, б) і обмежувачі вигину (б)

Наявність упорів, особливо обмежують переміщення ІТ перпендикулярно його площині, приводить до значної зміни напруженого стану конструкції пружного підвісу та ІТ при виникненні контакту. При відсутності упорів контакт ІТ здійснюється по площині, при цьому навіть при дуже великих перевантаженнях контактні напруги малі, проте можливі замикання електричних контактів. Якщо ж контакт здійснюється тільки по дискретним точкам в місцях розташування упорів, то ІТ піддається згину. При цьому визначальними стають нормальні напруги згину, і небезпека руйнування при ударі може зростати на порядки. Можливо також комбінований напружений стан, при якому ІТ під дією сил інерції сідає на упори, але в той же час в проміжках між ними відбувається контакт вигнутої поверхні ІТ з опорною площиною.

Зазвичай після посадки на упори жорсткість пружних елементів несуттєва, проте, як правило, потрібно враховувати деформації номінально плоскій поверхні ІТ перед посадкою на упори, внаслідок чого дотик упорів поверхнею ІТ відбувається не одночасно, а при збільшенні навантаження з часом. При

цьому ІТ в цілому повинно розглядатися як тонка пружна пластина. При звичайній складній конфігурації ІТ і пружного підвісу необхідно використовувати КЕА (Рисунок 2.7, а). З результатів вибіркового чисельних розрахунків з'ясовується, що екстремальні пружні переміщення досягаються в зонах найбільшого віддалення від упорів, а найбільші напруги згину - як правило, над упорами.

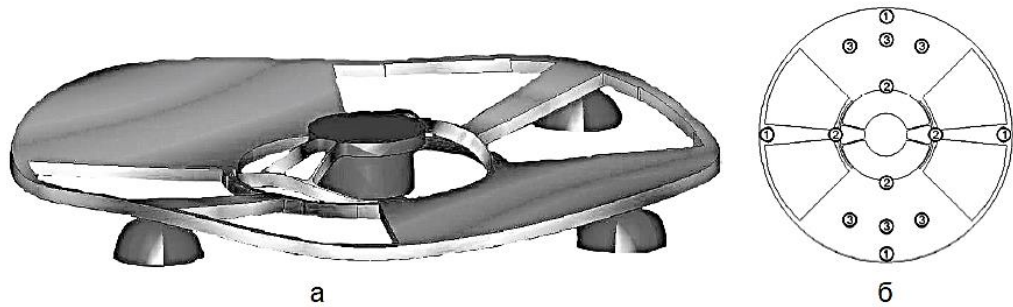


Рисунок 2.7 – Деформації ІТ і пружного підвісу при контакті з упорами ( а ) і варіанти розташування упорів (б)

Для оцінки ефективності установки упорів у літературі було розглянуто три варіанти їх розташування (Рисунок 2.7, б): (1) чотири упору, рівномірно розташовані по колу на зовнішньому діаметрі ІТ; (2) чотири упору, рівномірно розташовані по колу на внутрішньому діаметрі ІТ; (3) по три упори під кожним масивним сектором ІТ (поза зоною гребінчатого двигуна). Напруження обчислювалися в замкнутому контурі пружних елементів підвісу методом КЕА (Рисунок. 2.8). Квазістатичний аналіз проводився при прискоренні, чинному на ІТ, рівному  $10^5 g$ .

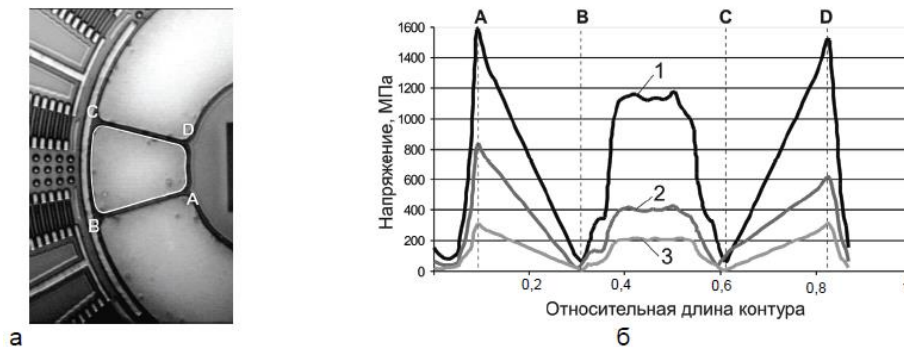


Рисунок 2.8 – Контур пружного підвісу (а) і напруги в контурі (б)



Розрахунки показують, що напруги в пружному підвісі сильно залежать від розташування упорів і шляхом вдалої конфігурації можуть бути знижені з 1600 МПа до 300 МПа. Як видно з Рисунка 2.8, б, тільки варіант (3) задовольняє вимогу щодо допустимого напруги в елементах підвісу  $\sigma_{\text{доп}} = 500$  МПа.

Контактні взаємодії в ММГ виникають при значних інерційних ударних навантаженнях. При цьому потрібне забезпечення удароміцності конструкції і збереження метрологічних характеристик приладу. На підставі даних про власні частоти конструкції ММГ і тривалості ударних імпульсів обґрунтована можливість використання квазістатичного аналізу ударних процесів.

## 2.5 Висновок по розділу 2

Використання багатомасових систем дозволяє підвищити вібростійкість ММГ для застосування їх в якості датчиків кутової швидкості високодинамічних об'єктів. Подібні ММГ допускається використовувати в частотному діапазоні вібрацій, що включає частоти власних коливань осциляторів. Таке рішення вимагає точного налаштування власних частот осциляторів. Для цього можуть бути використані системи електричної жорсткості, що дозволяють компенсувати технологічні розкиди частот внаслідок похибок виготовлення елементів конструкції

Контактні взаємодії в ММГ виникають при значних інерційних ударних навантаженнях. При цьому потрібне забезпечення удароміцності конструкції і збереження метрологічних характеристик приладу. На підставі даних про власні частоти конструкції ММГ і тривалості ударних імпульсів обґрунтована можливість використання квазістатичного аналізу ударних процесів. В результаті досліджень, проведених методом КЕА, отримані дані про механічні напруження в конструкції при дії удару в площині ІТ і в напрямку, перпендикулярному площині ІТ. Показано, що елементи конструкції, такі як пружний підвіс, зубці двигуна, здатні витримувати значні перевантаження - до  $10^5 g$ . При цьому можна сформулювати наступні рекомендації щодо вибору параметрів конструкцій ММГ, стійких до впливу удару: підвищення власних частот конструкції і, отже, збільшення жорсткості пружного підвісу і установка упорів - обмежувачів переміщення елементів конструкції. Найбільш складними є завдання розрахунку ударостійкості, коли можливі контакти в різних точках, і завдання розрахунку багатоударних режимів.

На основі проведеного аналізу методів підвищення завадостійкості ММГ обрано конструктивно-схемний спосіб, котрий полягає у використанні багатомасового ММГ RR-типу з протифазним збудженням первинних коливань кожного з інерційних тіл.

### РОЗДІЛ 3. ІМІТАЦІЙНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ МІКРОМЕХАНІЧНОГО ГІРОСКОПА НА ВІБРУЮЧІЙ ОСНОВІ

Ідеальний ММГ RR-типу повинен бути нечутливий до поступальної вібрації внаслідок кутових первинних і вторинних коливань. Однак інструментальні похибки, наявність нелінійностей і кінцева жорсткість пружного підвісу в напрямку осей X, Y і Z призводять до прояви впливу поступальної вібрації на вихідний сигнал датчика.

При випробуваннях таких ММГ виявлені резонансні явища в широкій смузі частот від 20 Гц до 2 кГц, незважаючи на те, що власні частоти пружного підвісу ІТ перевищують 3 кГц. Аналіз експериментальних даних показав, що виявлені резонанси на субгармоніках ( $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{3}$ ,  $\frac{1}{4}$ , ...) частот первинних і вторинних коливань пружного підвісу обумовлюються нелінійностями характеристик електромеханічних елементів СУ. Ці нелінійності пов'язані з конструктивними особливостями приладу - використанням перетворювача кута у вигляді пари електродів як плоского конденсатора змінної ємності в датчиках кута (ДУ) вторинних (вихідних) коливань і датчиках моментів вторинних коливань (ДМ). Один з електродів конденсатора утворений сектором поверхневого шару дискового ІТ на пружному підвісі, що при дії інерційних навантажень призводить до зміни зазору, ємності і, в кінцевому рахунку, до нелінійності ланцюга СУ. При цьому сила взаємодії двох пластин конденсатора прямо пропорційна квадрату величини електричної напруги і обернено пропорційна квадрату величини зазору між пластинами.

Для забезпечення інваріантності зазору в датчиках системи управління при зовнішніх перевантаженнях плоский конденсатор повинен зберігати зазор і бути утворений дисковим ІТ на пружному підвісі і рухомим електродом (РЕ) на своєму пружному підвісі. Причому власні частоти поступальних коливань ІТ і РЕ в відповідних пружних підвісах обираються рівними або, принаймні,

близькими. Схема такого ММГ показана на Рисунку 3.1, на якій РЕ представлений у вигляді площадки з двома парами електродів ДК і ДМ.

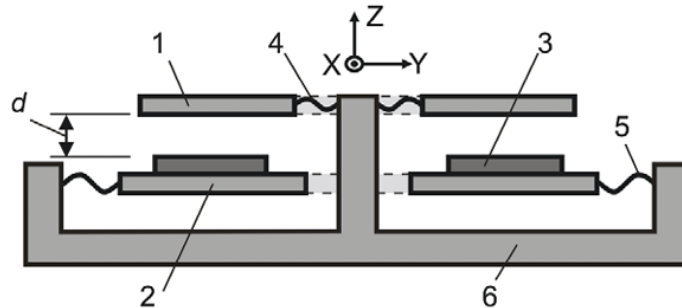


Рисунок 3.1 – Схема ММГ з електродами на пружному підвісі  
1 – ІТ; 2 – площадка ПЕ; 3 – електроди ДК і ДМ; 4 – пружний підвіс ІТ; 5 – пружний підвіс РЕ; 6 – основа; d – зазор між ІТ і РЕ.

Внаслідок впливу прискорення, наприклад, в напрямку осі Z відбуваються рівні деформації пружних підвісів ІТ і РЕ, забезпечуючи незмінність зазору між ними. Амплітуди вимушених переміщень ІТ і РЕ під дією постійного або вібраційного прискорень рівні або близькі (в залежності від співвідношення власних частот підвісів).

Для дослідження ММГ з РЕ при наявності вібрації по осі Z за основу прийнята математична модель, що враховує електромеханічні взаємодії в ємнісних перетворювачах, яка доповнена системою рівнянь руху ПЕ. Таким чином, ця модель являє собою дві системи диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} \ddot{z}_1 + 2\xi_{z1}\omega_{z1}\dot{z}_1 + \omega_{z1}^2 z_1 = W_z + (W_1 + W_2), \\ \dot{\gamma}_1 + 2\xi_{\gamma1}\omega_{\gamma1}\dot{\gamma}_1 + \omega_{\gamma1}^2 \gamma_1 = \varepsilon_{\gamma}^B, \\ \ddot{\alpha}_1 + 2\xi_{\alpha1}\omega_{\alpha1}\dot{\alpha}_1 + \omega_{\alpha1}^2 \alpha_1 = -2\Omega_y \dot{\gamma}_1 + \varepsilon_{\alpha1}^{DM} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \ddot{z}_2 + 2\xi_{z2}\omega_{z2}\dot{z}_2 + \omega_{z2}^2 z_2 = W_z - (W_1 + W_2), \\ \ddot{\alpha}_2 + 2\xi_{\alpha2}\omega_{\alpha2}\dot{\alpha}_2 + \omega_{\alpha2}^2 \alpha_2 = -\varepsilon_{\alpha2}^{DM}. \end{cases} \quad (2)$$

В системах використані наступні позначення:

$z_1, z_2$  – прогиби пружних підвісів ІТ і РЕ по осі Z;

$\gamma_1, \alpha_1$  – амплітуди кута коливань ІТ по осі первинних коливань (вісь X) і вторинних (вісь Z) коливань;

$\alpha_2$  – амплітуда кута коливань РЕ по осі X;

$\omega_{\alpha 1}, \omega_{\alpha 2}$  – власні частоти кутових коливань ІТ і РЕ по осі X;

$\omega_{\gamma 1}$  – власна частота кутових коливань ІТ по осі Z;

$\omega_{z1}, \omega_{z2}$  – власні частоти поступальних коливань ІТ і РЕ по осі Z;

$\xi_{z1}, \xi_{\gamma 1}, \xi_{\alpha 1}, \xi_{z2}, \xi_{\alpha 2}$  – коефіцієнти затухання відповідних контурів коливань ІТ і РЕ;

$W_z$  – прискорення вздовж осі Z, викликане зовнішніми навантаженнями;

$W_1 = F_1/m_1, W_2 = F_2/m_2$  – прискорення, створювані силами  $F_1$  і  $F_2$  на електродах ДМ;

$m_1, m_2$  – маси ІТ і РЕ;

$\varepsilon_{\gamma}^B = M_{\gamma 1}^B/J_{z1}$  – кутове прискорення, викликане моментом сил збудження  $M_{\gamma 1}^B$  по осі первинних коливань;

$J_{x1}, J_{z1}$  – моменти інерції ІТ по осях X і Z;

$J_{x2}$  – моменти інерції РЕ по осі X;

$\Omega_y$  – вимірювана кутова швидкість.

Кутові і поступальні переміщення ІТ відносно РЕ визначаються з виразу

$$\begin{aligned}\alpha &= \alpha_1 - \alpha_2, \\ z &= z_1 - z_2.\end{aligned}\tag{3}$$

Сили, виникаючі на електродах ДМ при подачі на них напруги, рівні

$$\begin{aligned}F_1 &= k_{\text{ДМ1}} U_1^2 (d - z - \alpha R)^{-2}, \\ F_2 &= k_{\text{ДМ2}} U_2^2 (d - z + \alpha R)^{-2}, \\ M_{\text{ДМ}}(\alpha) &= (F_1 - F_2)R, \\ k_{\text{ДМ1}} &= 1/2 \varepsilon_A S_{\text{ДМ1}}, k_{\text{ДМ2}} = 1/2 \varepsilon_A S_{\text{ДМ2}},\end{aligned}\tag{4}$$

де:  $\varepsilon_A$  – абсолютна діелектрична проникність;

$S_{\text{ДМ1}}, S_{\text{ДМ2}}$  – площі електродів ДМ;

$U_1, U_2$  – змінні напруги на електродах ДМ, що формуються в СУ на основі зміни ємності на обкладках ДК  $\Delta C$  і забезпечують демпфування вторинних коливань;

$d$  – нормальне значення зазору між обкладками ДМ і ДУ;

$R$  – середній радіус розташування електродів ДМ і ДУ.

Зміна ємності на обкладках ДК вираховується при міцності наступних виразів:

$$\begin{aligned}\Delta C &= C_1 - C_2, \\ C_1 &= k_{ДУ1}(d - z - \alpha R)^{-1}, \\ C_2 &= k_{ДУ2}(d - z + \alpha R)^{-1}, \\ k_{ДУ1} &= \varepsilon_A S_{ДУ1}, k_{ДУ2} = \varepsilon_A S_{ДУ2},\end{aligned}\tag{5}$$

де:  $S_{ДУ1}, S_{ДУ2}$  – площі електродів ДУ;

$C_1$  і  $C_2$  – ємності на електродах ДУ.

Блок-схема математичної моделі (1)-(6) представлена на Рисунку 3.2.

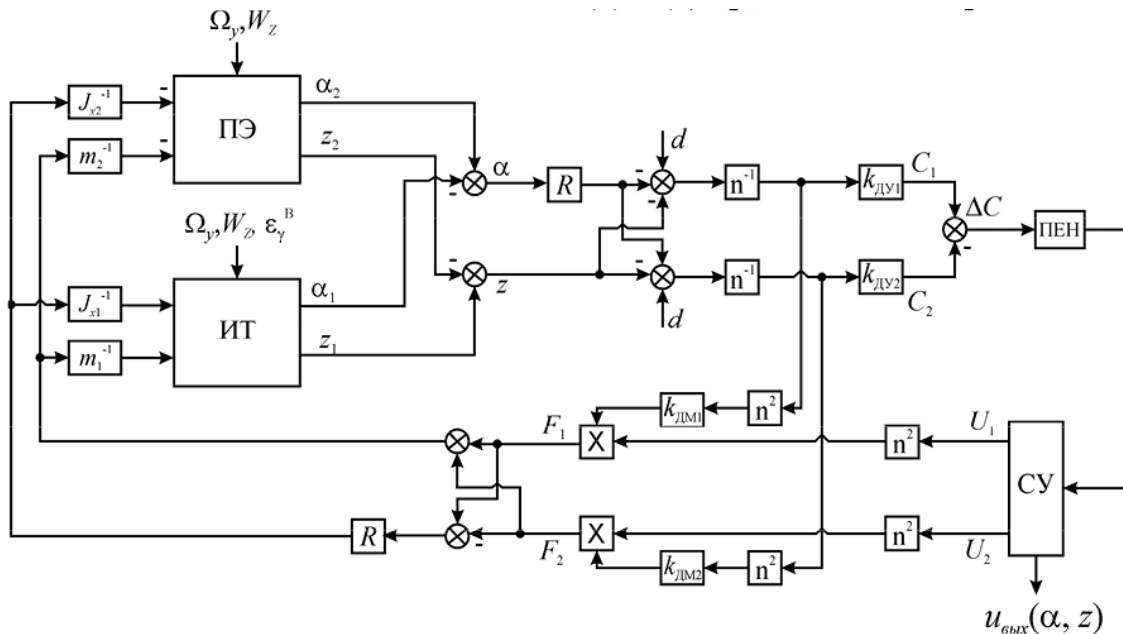


Рисунок 3.2 - Блок-схема моделі ММГ з ПЕ.

ПЕН – перетворювач «ємність – напруга»;  $n^{-1}, n^2$  – оператори перетворення;  $u_{\text{вих}}(\alpha, z)$  – вихідний сигнал ММГ.

Системи рівнянь (1) і (2) описують динаміку ІТ і РЕ відповідно, рівняння (3) враховують взаємозв'язок як поступальних, так і кутових коливань ІТ і РЕ,

рівняння (4), (5) і (6) описують електромеханічні взаємозв'язки в приладі, що утворюються в ДМ і ДК.

У системі рівнянь (1) не враховується вплив напруг  $U_1$ ,  $U_2$  на зміну власних частот  $\omega_{\alpha 1}$ ,  $\omega_{\alpha 2}$ ,  $\omega_{z1}$ ,  $\omega_{z2}$  і формування «негативних» жорсткостей. Вплив вібрації на вторинні кутові коливання ІГ визначається членом  $\varepsilon_{\alpha 1}^{\text{ДМ}}$ , так як характеристики ДМ і прикладуваний момент залежать від поступального руху по осі OZ.

### 3.1 Опис імітаційної моделі

Імітаційне моделювання динаміки ММГ в умовах вібрації проводилося для гіроскопа з параметрами «ММГ-2» від ЦНИИ-Электроприбор. «ММГ-2» має наступні значення параметрів:

$$\omega_{\alpha 1} = 20\,420 \text{ рад/с (3250 Гц)},$$

$$\omega_{\gamma 1} = 18\,944 \text{ рад/с (3015 Гц)},$$

$$\omega_{z1} = 57\,805 \text{ рад/с (9200 Гц)}.$$

Інші значення параметрів:

$$\varepsilon_A = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м};$$

$$\omega_{z2} = \omega_{z1} (1 + \delta\omega); \quad \xi_{\alpha 1} = \xi_{\alpha 2} = 5 \cdot 10^{-5}; \quad \xi_{z1} = \xi_{z2} = 2 \cdot 10^{-4}; \quad \xi_{\gamma 1} = 5 \cdot 10^{-6};$$

$$m_1 = m_2 = 8 \cdot 10^{-7} \text{ кг}; \quad J_{x1} = J_{x2} = 5,25 \cdot 10^{-13} \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad J_{z1} = 7,26 \cdot 10^{-13} \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$S_{\text{ДМ}1} = 0,3 \text{ мм}^2; \quad S_{\text{ДМ}2} = \delta_{\text{ДМ}} \cdot S_{\text{ДМ}1}; \quad S_{\text{ДУ}1} = 1 \text{ мм}^2; \quad S_{\text{ДУ}2} = \delta_{\text{ДК}} \cdot S_{\text{ДУ}1};$$

$$d = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \quad R = 1,025 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Всі параметри вводяться в файл «MODEL\_M.m» з розмірністю, що відповідає системі СІ. Було створено модель ММГ RR-типу з РЕ в Simulink (Рисунки 3.3-3.4).

1 – Підсистема поступальних прискорень; 2 – підсистема кут. швидкостей



### 3.2 Проведення досліджень ідеальної роботи ММГ з рухомими елементами

Дослідимо ідеальну роботу ММГ, в якому власні частоти ІТ  $\omega_{\alpha 1}$ ,  $\omega_{z1}$  і РЕ  $\omega_{\alpha 2}$ ,  $\omega_{z2}$  співпадають.

1. Дослідження впливу постійної кутової швидкості показано на рис.3.5. Результат вимірювання різних значень вхідної кутової швидкості зведено у табл.3.1

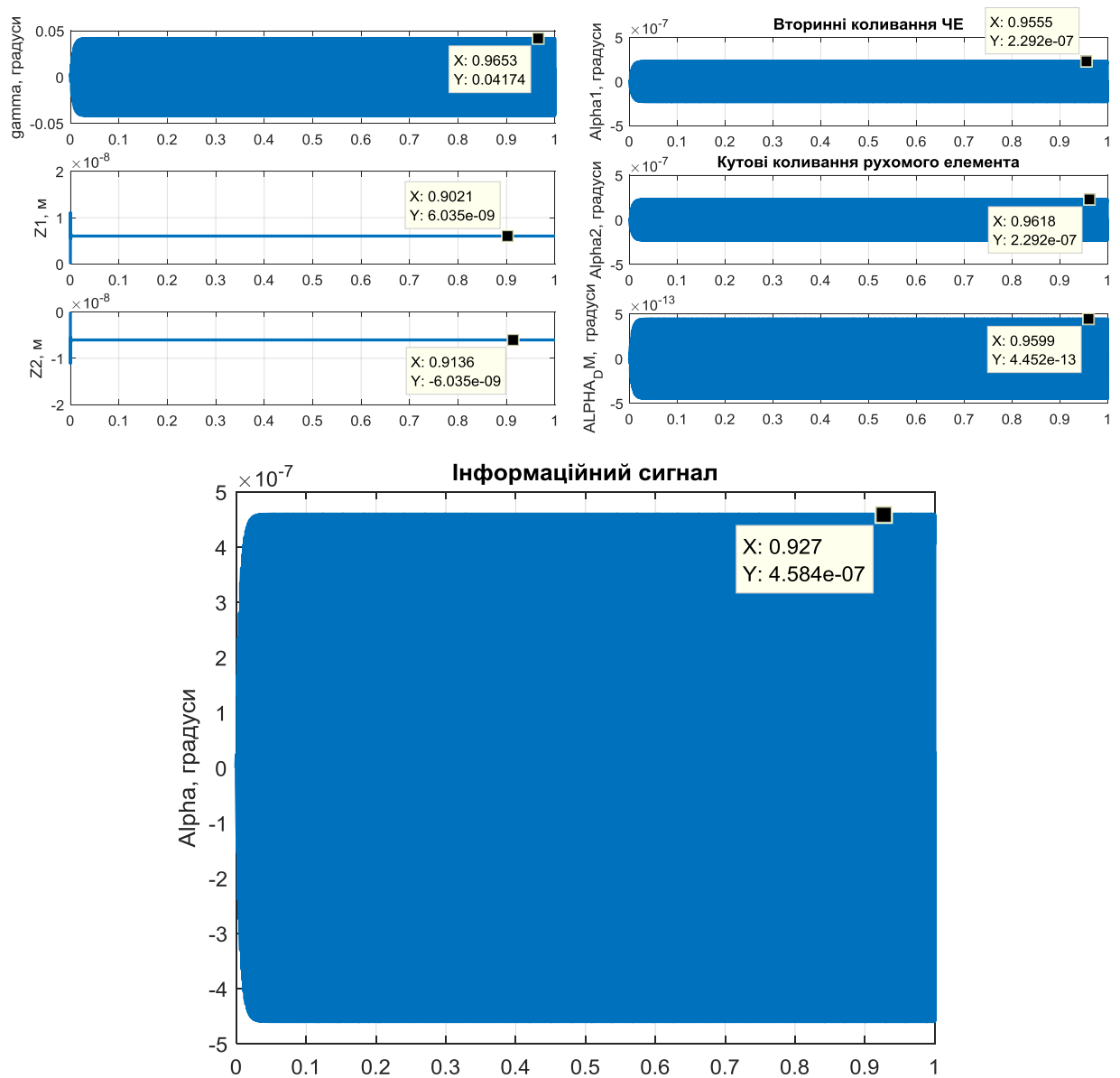


Рисунок 3.5. Вплив постійної кут. швидкості обертання основи на ідеальний ММГ RR-типу

Таблиця 3.1. Вимірювання постійної кут. швидкості ідеальним ММГ RR-типу

Змінюваний параметр	Макс. відхилення ЧЕ по вторинних коливаннях $\alpha_{MMG\_max}$ , $\alpha_{MMG\_min}$
$\Omega_y = 1^\circ/c$	$4.58391992718232e-07$ $-4.58917055403087e-07$
$\Omega_y = 10^\circ/c$	$4.58391992704491e-06$ $-4.58917055394544e-06$
$\Omega_y = 50^\circ/c$	$2.29458527697285e-05$ $-2.29195996349016e-05$
$\Omega_y = 100^\circ/c$	$4.58841032973724e-05$ $-4.58650965371488e-05$

## 2. Дослідження впливу змінної кутової швидкості ( рис.3.6, табл. 3.2)

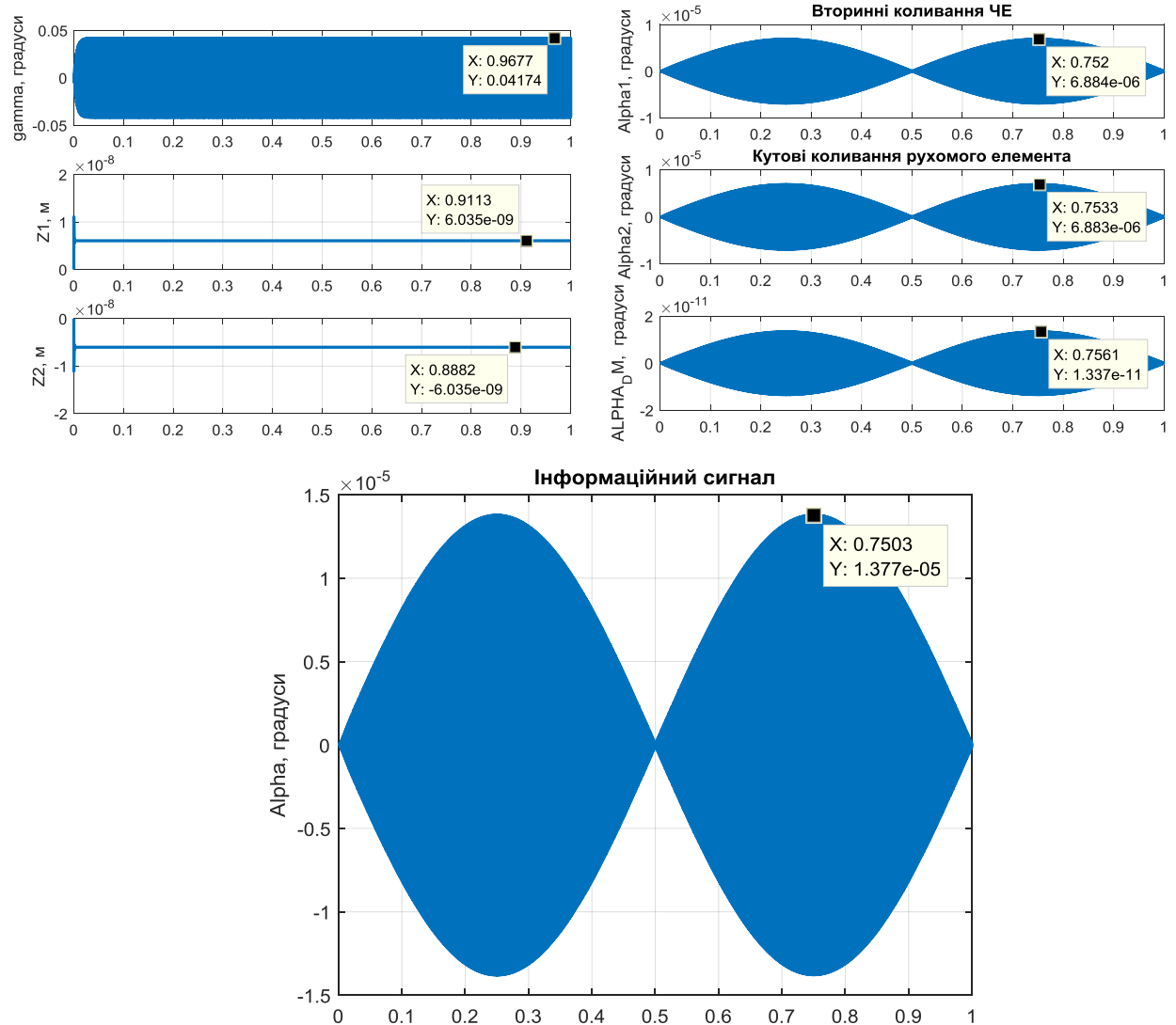


Рисунок 3.6. Вплив змінюваної кут. швидкості обертання основи на ідеальний ММГ RR-типу

Таблиця 3.2. Вимірювання змінюваної кут. швидкості ідеальним ММГ RR-типу

Omega_y=0, Omega_y_max=30 °/с	
Змінюваний параметр	Макс. відхилення ЧЕ по вторинних коливаннях alpha_MMG_max, alpha_MMG_min
Omega_y_freq=1 Гц	1.37679620868461e-05 -1.37679683052971e-05
Omega_y_freq=20 Гц	1.38475534400831e-05 -1.38474469124909e-05
Omega_y_freq=50 Гц	1.42790759983898e-05 -1.42789731208688e-05
Omega_y_freq=100 Гц	1.60371191013511e-05 -1.60371704375872e-05
Omega_y=0, Omega_y_max=100 °/с	
Omega_y_freq=1 Гц	4.58856299081488e-05 -4.58856608072895e-05
Omega_y_freq=20 Гц	4.61535635250574e-05 -4.61534274744718e-05
Omega_y_freq=50 Гц	4.76117085968968e-05 -4.76109473208663e-05
Omega_y_freq=100 Гц	5.34494171721778e-05 -5.34537360002612e-05

3. Дослідження впливу дії постійного прискорення ( рис.3.7а, 3.7б, табл. 3.3)

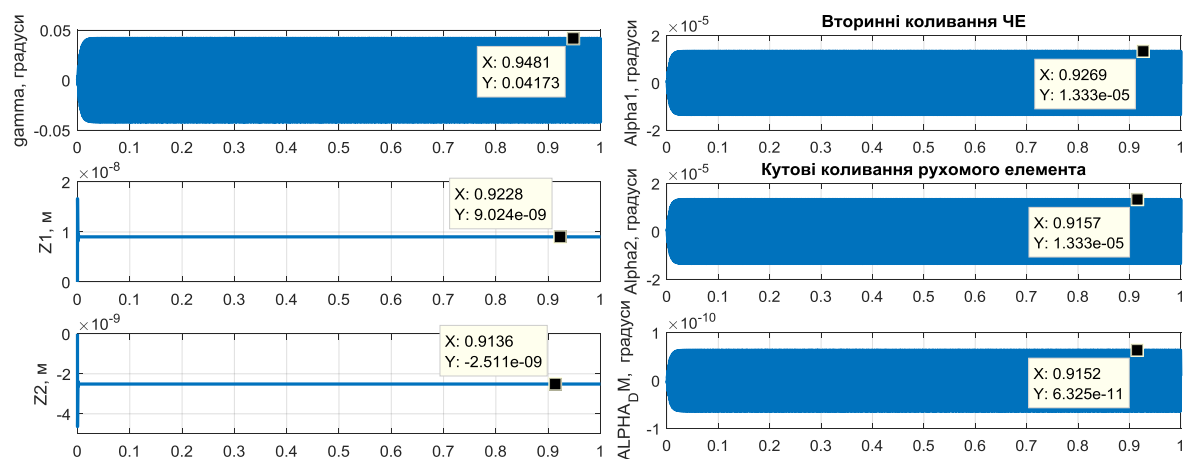


Рисунок 3.7а. Вплив дії пост. прискорення основи на ідеальний ММГ RR-типу

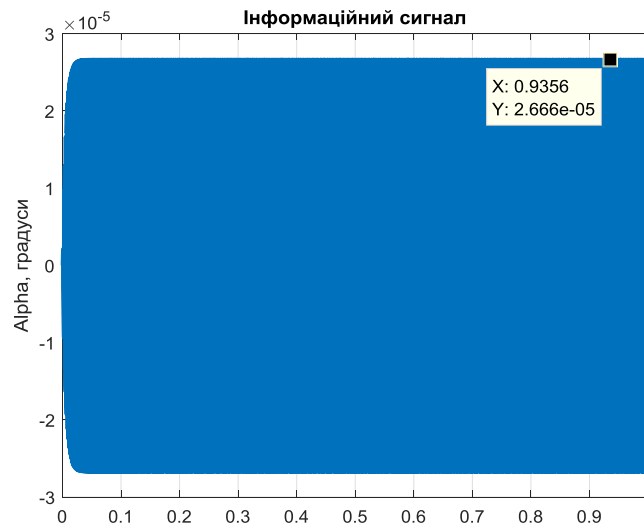


Рисунок 3.7б. Вплив дії пост. прискорення основи на ідеальний ММГ RR-типу

Таблиця 3.3. Вимірювання пост. кут. швидкості ідеальним ММГ RR-типу при дії постійного зовнішнього прискорення

Omega_y=100 °/с	
Змінюваний параметр	Макс. відхилення ЧЕ по вторинних коливаннях alpha_MMG_max, alpha_MMG_min
Wz_const=10 м/с <sup>2</sup>	4.58841032986443e-05 -4.58650964751368e-05
Wz_const=50 м/с <sup>2</sup>	4.58650965269917e-05 -4.58841033042329e-05
Wz_const=100 м/с <sup>2</sup>	4.58841032934019e-05 -4.58650965053777e-05
Wz_const=400 м/с <sup>2</sup>	4.58841032953545e-05 -4.58650964770594e-05

4. Дослідження впливу дії зовнішнього гармонічного прискорення (рис.3.8, табл. 3.4).

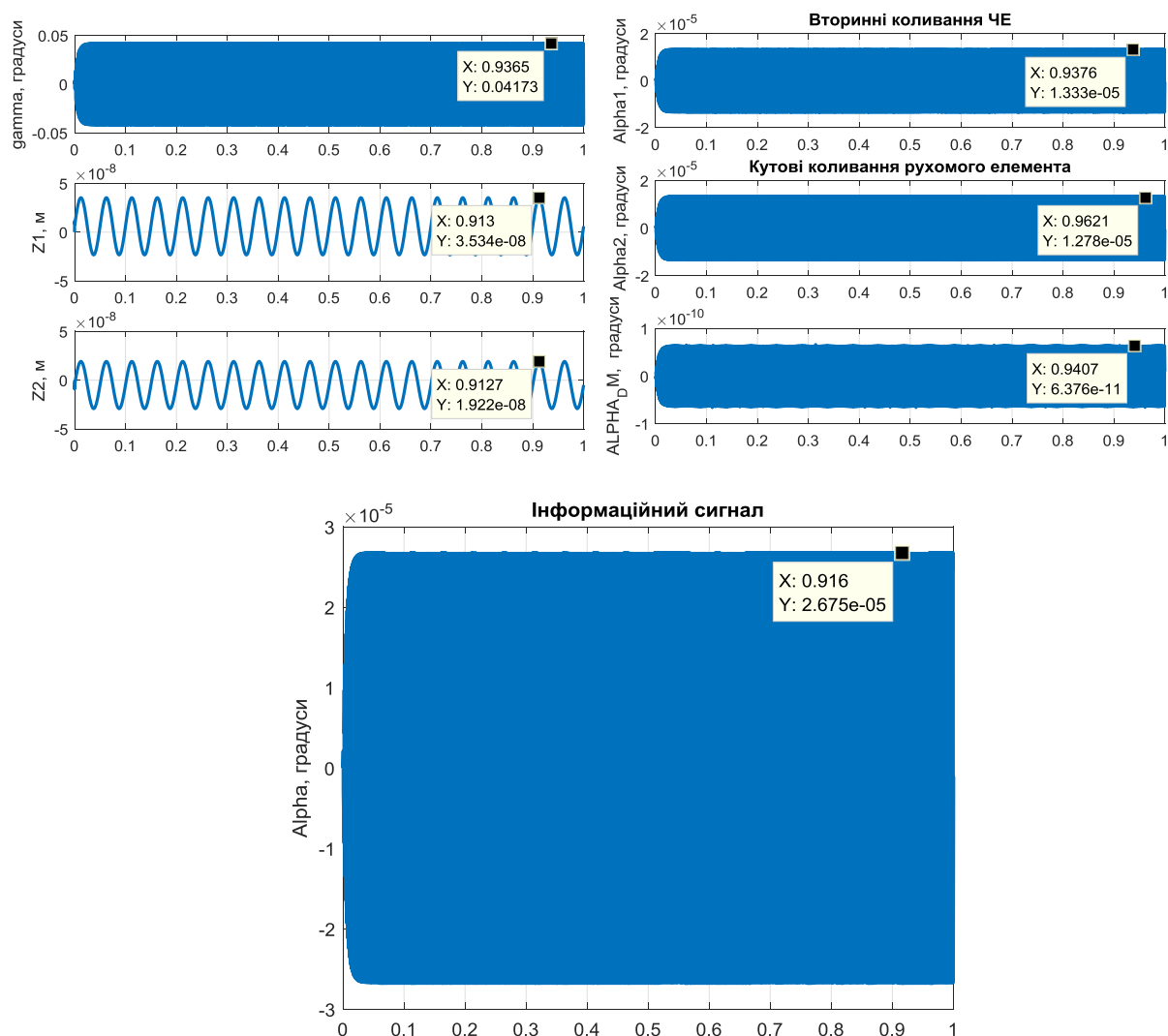


Рисунок 3.8. Вплив дії змінного прискорення основи на ідеальний ММГ RR-типу

Таблиця 3.4. Вимірювання пост. кут. швидкості ідеальним ММГ RR-типу при дії змінного зовнішнього прискорення

Omega_y=100 °/с		Wz_om_max=10g	
Змінюваний параметр		Макс. відхилення ЧЕ по вторинних коливаннях alpha_MMG_max, alpha_MMG_min	
Wz_freq= 20 Гц		4.58841032973724e-05	-4.58650965371488e-05
Wz_freq= 100 Гц		4.58841032973724e-05	-4.58650965371488e-05
Wz_freq= 500 Гц		4.58841032973724e-05	-4.58650965371488e-05

**Висновки:** як видно з досліджень такий гіроскоп є нечутливим до дії зовнішнього прискорення та вібрації.

Проте, ММГ з такими характеристиками неможливий, тому що завжди внаслідок технологічних похибок виготовлення буде існувати розузгодження власних частот ІТ і РЕ. Дослідимо таку систему, вважаючи що розузгодження власних частот ІТ та РЕ складає 10% («реальний ММГ»).

### 1. Дослідження впливу постійної кутової швидкості ( рис.3.9, табл. 3.5)

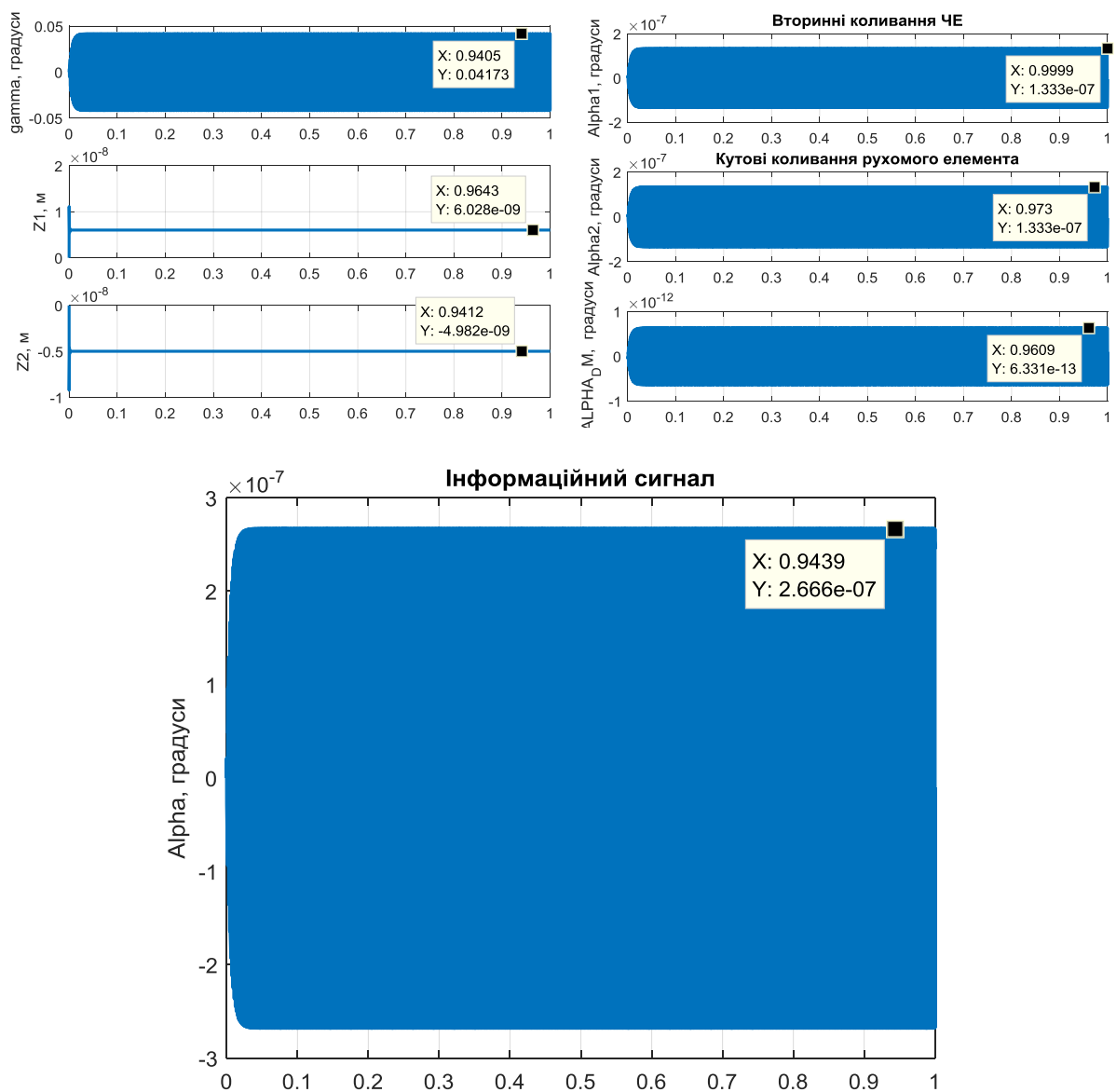


Рисунок 3.9. Вплив постійної кут. швидкості обертання основи на реальний ММГ RR-типу

Таблиця 3.5. Вимірювання постійної кут. швидкості реальним ММГ RR-типу

Змінюваний параметр	Макс. відхилення ЧЕ по вторинних коливаннях $\alpha_{\text{MMG\_max}}$ , $\alpha_{\text{MMG\_min}}$
$\Omega_y = 1^\circ/\text{с}$	$2.66583025651937\text{e-}07$ $-2.67407185001203\text{e-}07$
$\Omega_y = 10^\circ/\text{с}$	$2.66583025603077\text{e-}06$ $-2.67407184997809\text{e-}06$
$\Omega_y = 50^\circ/\text{с}$	$1.337035924989\text{e-}05$ $-1.33291512795915\text{e-}05$
$\Omega_y = 100^\circ/\text{с}$	$2.67407061399318\text{e-}05$ $-2.66592993179682\text{e-}05$

## 2. Дослідження впливу змінної кутової швидкості (рис.3.10, табл. 3.6).

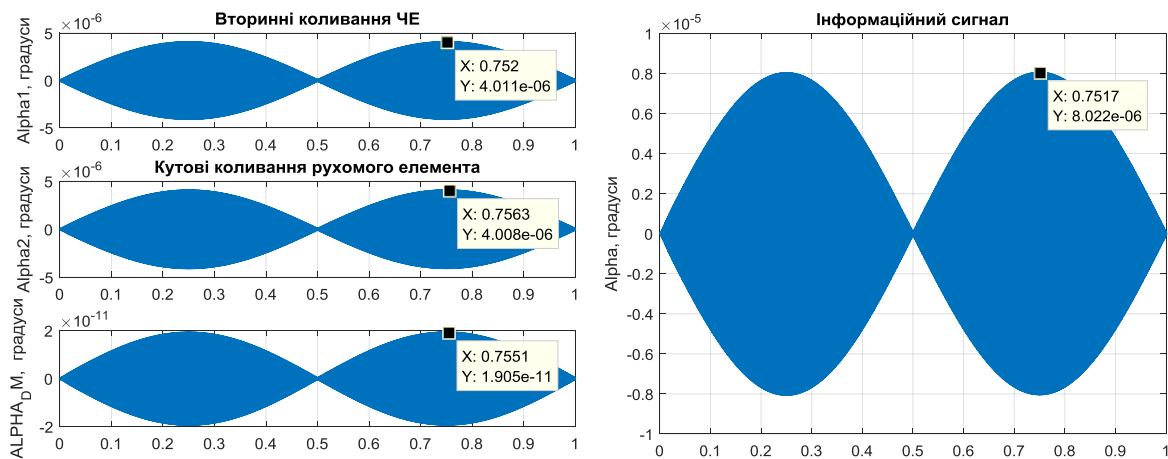


Рисунок 3.10. Вплив змінюваної кут. швидкості обертання основи на реальний ММГ RR-типу

Таблиця 3.6. Вимірювання змінюваної кут. швидкості реальним ММГ RR-типу

$\Omega_y = 0$ , $\Omega_{y\_max} = 30^\circ/\text{с}$	
Змінюваний параметр	Макс. відхилення ЧЕ по вторинних коливаннях $\alpha_{\text{MMG\_max}}$ , $\alpha_{\text{MMG\_min}}$
$\Omega_{y\_freq} = 1 \text{ Гц}$	$8.02240939256973\text{e-}06$ $-8.02240891159401\text{e-}06$
$\Omega_{y\_freq} = 20 \text{ Гц}$	$8.03978730563513\text{e-}06$ $-8.03975478929089\text{e-}06$
$\Omega_{y\_freq} = 50 \text{ Гц}$	$8.13247298024982\text{e-}06$ $-8.13251670323242\text{e-}06$
$\Omega_{y\_freq} = 100 \text{ Гц}$	$8.48151125848264\text{e-}06$

	-8.48150681299846e-06
$\Omega_{y=0}$	$\Omega_{y\_max}=100$ °/с
$\Omega_{y\_freq}=1$ Гц	2.67413521800872e-05 -2.6741350582084e-05
$\Omega_{y\_freq}=20$ Гц	2.67992744522642e-05 -2.67991659358627e-05
$\Omega_{y\_freq}=50$ Гц	2.71083586572454e-05 -2.71081821202631e-05
$\Omega_{y\_freq}=100$ Гц	2.8271599687598e-05 -2.82715980381926e-05

### 3. Дослідження впливу постійного прискорення (рис.3.11, табл. 3.7).

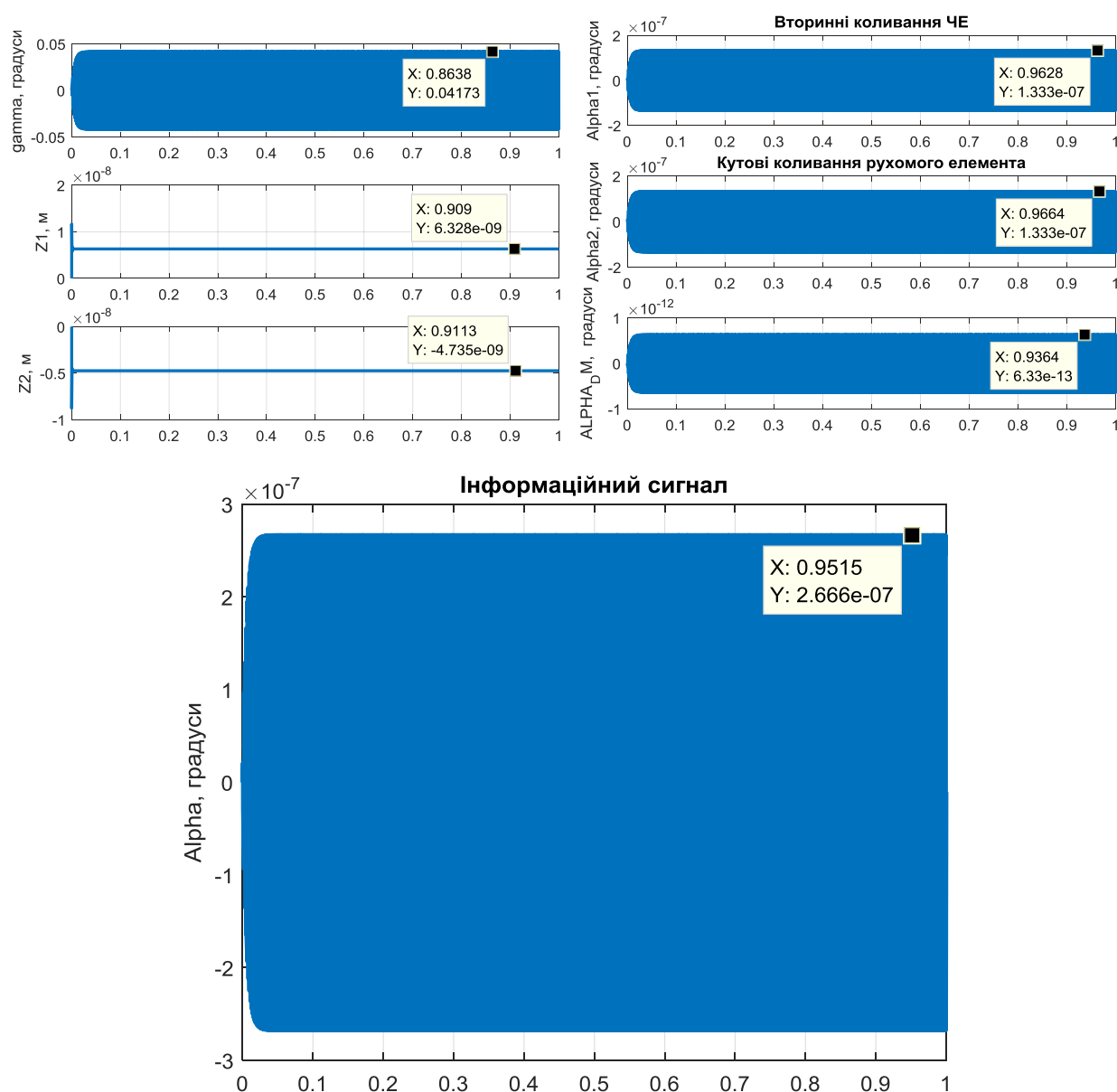


Рисунок 3.11. Вплив дії пост. прискорення основи на реальний ММГ RR-типу



Таблиця 3.7. Вимірювання пост. кут. швидкості реальним ММГ RR-типу при дії постійного зовнішнього прискорення

Omega_y=1 °/с	
Змінюваний параметр	Макс. відхилення ЧЕ по вторинних коливаннях alpha_MMГ_max, alpha_MMГ_min
Wz_const=1 м/с <sup>2</sup>	2.66583025616519e-07 -2.67407185020231e-07
Wz_const=10 м/с <sup>2</sup>	2.67407185208399e-07 -2.66583025826307e-07
Wz_const=100 м/с <sup>2</sup>	2.67600963647761e-07 -2.6759698686201e-07
Wz_const=300 м/с <sup>2</sup>	2.67909947291997e-07 -2.6792548444138e-07
Wz_const=400 м/с <sup>2</sup>	2.68027957331732e-07 -2.68044789291904e-07
Omega_y=10 °/с	
Wz_const=1 м/с <sup>2</sup>	2.66583025611036e-06 -2.67407185018067e-06
Wz_const=10 м/с <sup>2</sup>	2.67407185210877e-06 -2.66583025855377e-06
Wz_const=100 м/с <sup>2</sup>	2.67586002873138e-06 -2.67583224160768e-06
Wz_const=300 м/с <sup>2</sup>	2.6791710798799e-06 -2.67918173216464e-06
Omega_y=50 °/с	
Wz_const=1 м/с <sup>2</sup>	1.3370359250886e-05 -1.33291512821124e-05
Wz_const=10 м/с <sup>2</sup>	1.33703592605647e-05 -1.33291512922776e-05
Wz_const=100 м/с <sup>2</sup>	1.33786372971622e-05 -1.33791137724461e-05
Wz_const=300 м/с <sup>2</sup>	1.33957928279222e-05 -1.33961293028735e-05
Omega_y=100 °/с	
Wz_const=1 м/с <sup>2</sup>	2.66592993085835e-05 -2.67407061419148e-05
Wz_const=10 м/с <sup>2</sup>	2.66592995022494e-05 -2.67407061617434e-05
Wz_const=100 м/с <sup>2</sup>	2.67582142620033e-05 -2.67582398117354e-05
Wz_const=300 м/с <sup>2</sup>	2.67923849435818e-05 -2.67933404865962e-05

4. Дослідження дії зовнішнього гармонічного прискорення та частоти (рис.3.12, табл. 3.8).

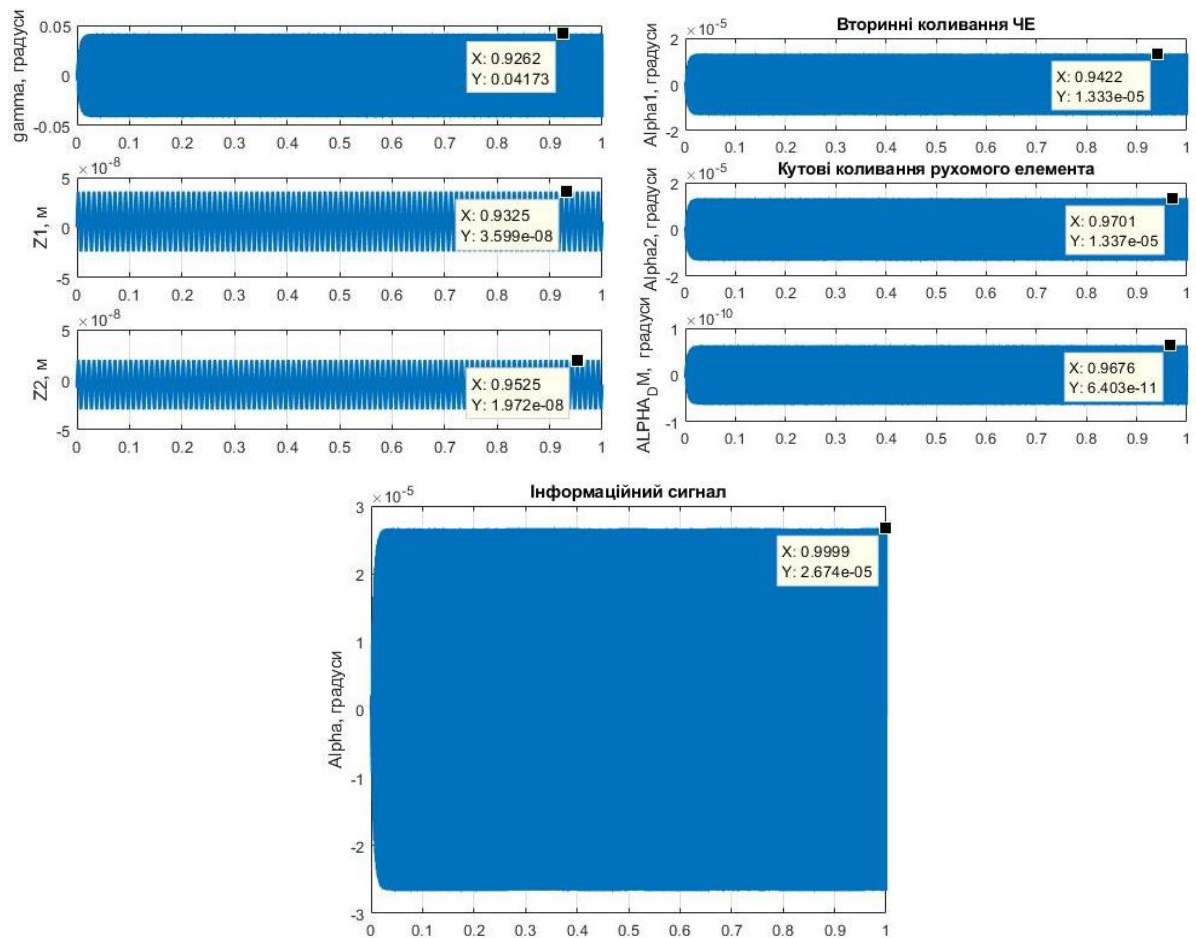


Рисунок 3.12. Вплив дії змінного прискорення основи на реальний ММГ RR-типу

Таблиця 3.8. Вимірювання пост. кут. швидкості реальним ММГ RR-типу при дії змінного зовнішнього прискорення

$\Omega_y = 100 \text{ }^\circ/\text{с}, \quad W_{z\_om\_max} = 100 \text{ м/с}^2$	
Змінюваний параметр	Макс. відхилення ЧЕ по вторинних коливаннях $\alpha_{MMG\_max}, \alpha_{MMG\_min}$
$W_{z\_freq} = 100 \text{ Гц}$	$2.67507160825523e-05$ $-2.67518923498747e-05$
$W_{z\_freq} = 300 \text{ Гц}$	$2.66593618670253e-05$ $-2.67407065496495e-05$
$\Omega_y = 100 \text{ }^\circ/\text{с}, \quad W_{z\_om\_max} = 300 \text{ м/с}^2$	
$W_{z\_freq} = 100 \text{ Гц}$	$2.67820884444566e-05$ $-2.67826928535057e-05$
$W_{z\_freq} = 300 \text{ Гц}$	$2.67727594496545e-05$ $-2.67741684146756e-05$

**Висновки:** за умови розузгодження власних частот ІТ та ПЕ, при дії постійної та змінної кутової швидкості амплітуда вторинних коливань збільшується та з'являється зміщення нуля, при дії постійного прискорення та вібрації амплітуда збільшується,

Вихідний сигнал ММГ в загальному виді можна представити у вигляді виразу  $u(t) = K_{\Pi}A(\Omega) = K_{\Pi\text{ЕН}}K_{\text{ДУВК}}A(\Omega_y)$ ,

де:  $K_{\Pi}$  – коефіцієнт перетворення ММГ;

$K_{\text{ДУВК}} = \Delta C / \alpha$  – коефіцієнт перетворення ДК вторинних коливань;

$K_{\Pi\text{ЕН}}$  – коефіцієнт перетворення «ємність – напруга»;

$A(\Omega_y)$  – огибаюча вторинних коливань, що несе інформацію про діючу кутову швидкість  $\Omega$ .

Саме огибаюча вторинних коливань є корисним сигналом гіроскопа.

Робота частотного детектора заснована на використанні частотної характеристики резонансного контуру. Якщо необхідно просто виділити сигнал з певною частотою, то робочу точку вибирають на частоті  $\omega_0$ . При цьому через те, що амплітудно-частотна характеристика контуру не ідеальна, виникає деяка паразитна модуляція сигналу по амплітуді. А що буде, якщо робочу точку вибрати не в максимумі характеристики, а на її боці.

Тоді зміна частоти сигналу призведе до відповідної зміни амплітуди сигналу. Тобто сигнал виявиться промодульованим також і по амплітуді (за законом близьким до закону зміни частоти), а це означає, що тепер для виділення модулюючого коливання можна буде продетектувати сигнал звичайним амплітудним детектором, що і робиться.

Синхронне детектування має низку переваг перед звичайним амплітудним детектуванням за допомогою діода або транзистора. Це прилад, який виводить сигнал ДКШ, модульований по амплітуді або фазі шляхом перетворення- множення на опорний сигнал, позбавлений від високочастотних коливань на частоті первинних коливань. Основна властивість синхронного детек-

тора – його завадостійкість та здатність виділяти корисний сигнал на фоні шумів, визначається тим, що всякий вхідний сигнал синхронного детектора, частота якого  $\omega$ , створює низькочастотну складову з частотою  $\delta\omega = \omega - \omega_0$ . Якщо  $\delta\omega > \Delta\omega$ , де  $\Delta\omega$  – полоса пропускання фільтра низьких частот, то паразитний сигнал подавляється при фільтрації. Множення сигналів в синхронному детекторі здійснюється зазвичай електричним ланцюгом.

Амплітудна модуляція змінює амплітуду несучої у відповідності з миттєвою величиною низькочастотного сигналу (Рисунок 3.13).

Математичний вираз амплітудної модуляції досить зрозумілий: множиться сигнал несучої на низькочастотний сигнал. Сигнал самої несучої не змінюється, але її амплітуда змінюється постійно в залежності від величини низькочастотного сигналу. Проте, відсутній контроль над інтенсивністю модуляції. Інакше кажучи, зв'язок між зміною низькочастотного сигналу ті зміною сигналу несучої частоти являється фіксованим. Не можна, наприклад, сконструювати систему таким чином, щоб невелика зміна у величині низькочастотного сигналу складала значну зміну амплітуди несучої. Щоб усунути його обмеження, водиться відомий нам індекс модуляції (який множиться на вихідний низькочастотний сигнал). Тепер, змінюючи індекс модуляції, можна контролювати інтенсивність впливу низькочастотного сигналу на амплітуду несучої.

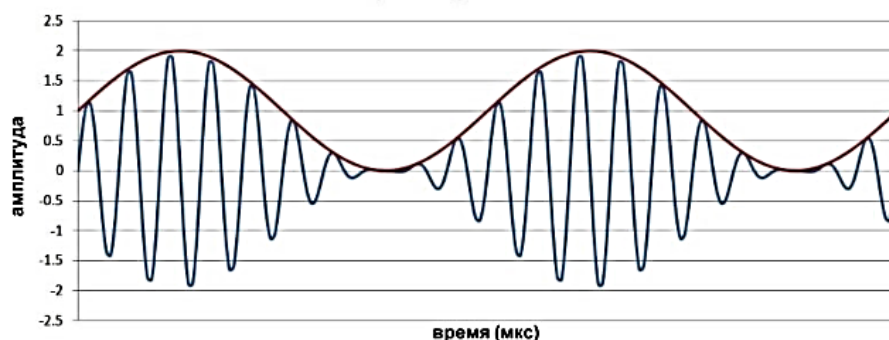


Рисунок 3.13. Несуча, помножена на зміщений низькочастотний сигнал

Амплітуда несучої тепер більш чутлива до зміни величини низькочастотного сигналу.

Проведемо дослідження застосування синхронного детектора при демодуляції сигналу вторинних коливань одномасного ММГ. При цьому було проведено калібровку коефіцієнта передачі вихідного тракту ММГ-синхронний детектор для кутової швидкості 100 °/с

1. Дослідження впливу пост. кутової швидкості (рис.3.14, таблиця 3.9)

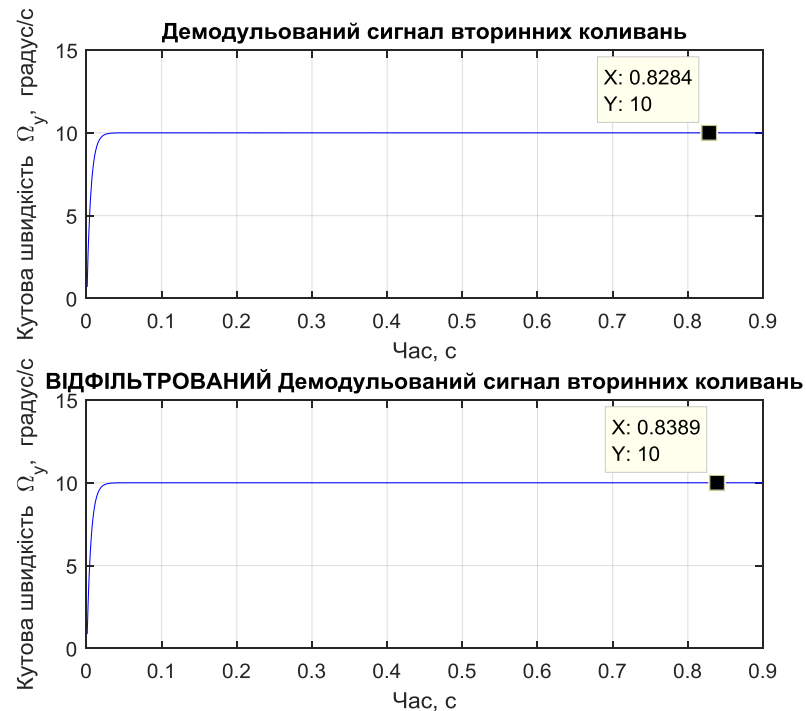


Рисунок 3.14. Сигнал на виході синхронного детектора одномасового ММГ при обертанні основи з сталою кут. швидкістю

Таблиця 3.9. Вимірювання постійної кут. швидкості ММГ RR-типу із застосуванням синхронного детектора

Змінюваний параметр	Макс. відхилення ЧЕ по вторинних коливаннях	Демодульований сигнал вторинних коливань (після синхр. детектора)
$\Omega_y = 1 \text{ } ^\circ/\text{с}$	$2.66583025651937\text{e-}07$ $-2.67407185001203\text{e-}07$	1 °/с
$\Omega_y = 10 \text{ } ^\circ/\text{с}$	$2.66583025603077\text{e-}06$ $-2.67407184997809\text{e-}06$	10 °/с
$\Omega_y = 50 \text{ } ^\circ/\text{с}$	$1.337035924989\text{e-}05$ $-1.33291512795915\text{e-}05$	50 °/с
$\Omega_y = 100 \text{ } ^\circ/\text{с}$	$2.67407061399318\text{e-}05$ $-2.66592993179682\text{e-}05$	100 °/с

2. Дослідження впливу змінної кутової швидкості (рис.3.15, таблиця 3.10).

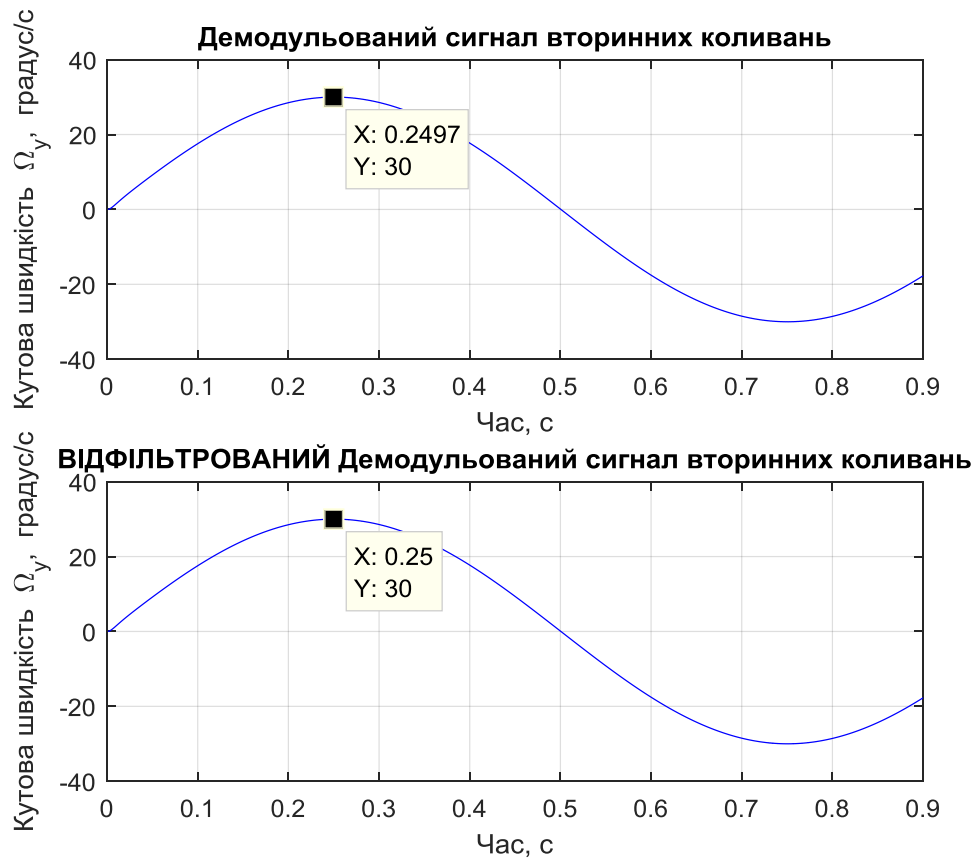


Рисунок 3.15. Сигнал на виході синхронного детектора одномасового ММГ при обертанні основи з змінюваною кут. швидкістю

Таблиця 3.10. Вимірювання змінюваної кут. швидкості ММГ RR-типу із застосуванням синхронного детектора

Omega_y=0, Omega_y_max=30 °/с		
Змінюваний параметр	Макс. відхилення ЧЕ по вторинних коливаннях	Демодульований сигнал вторинних коливань (після синхр. детектора)
Omega_y_freq=1 Гц	8.02240939256973e-06 -8.02240891159401e-06	30°/с
Omega_y_freq=20 Гц	8.03978730563513e-06 -8.03975478929089e-06	(30,01) 29,94 °/с
Omega_y_freq=50 Гц	8.13247298024982e-06 -8.13251670323242e-06	(30,12) 29,63°/с

Omegay_freq=100 Гц	8.48151125848264e-06 -8.48150681299846e-06	(30,5) 28,6 °/с
Omega_y=0,	Omegay_max=100 °/с	
Omegay_freq=1 Гц	2.67413521800872e-05 -2.6741350582084e-05	100 °/с
Omegay_freq=20 Гц	2.67992744522642e-05 -2.67991659358627e-05	(100) 99,8 °/с
Omegay_freq=50 Гц	2.71083586572454e-05 -2.71081821202631e-05	(99,74) 98,79 °/с
Omegay_freq=100 Гц	2.8271599687598e-05 -2.82715980381926e-05	(101,5) 95,32 °/с

### 3. Дослідження впливу постійного прискорення (рис.3.16, таблиця 3.11).

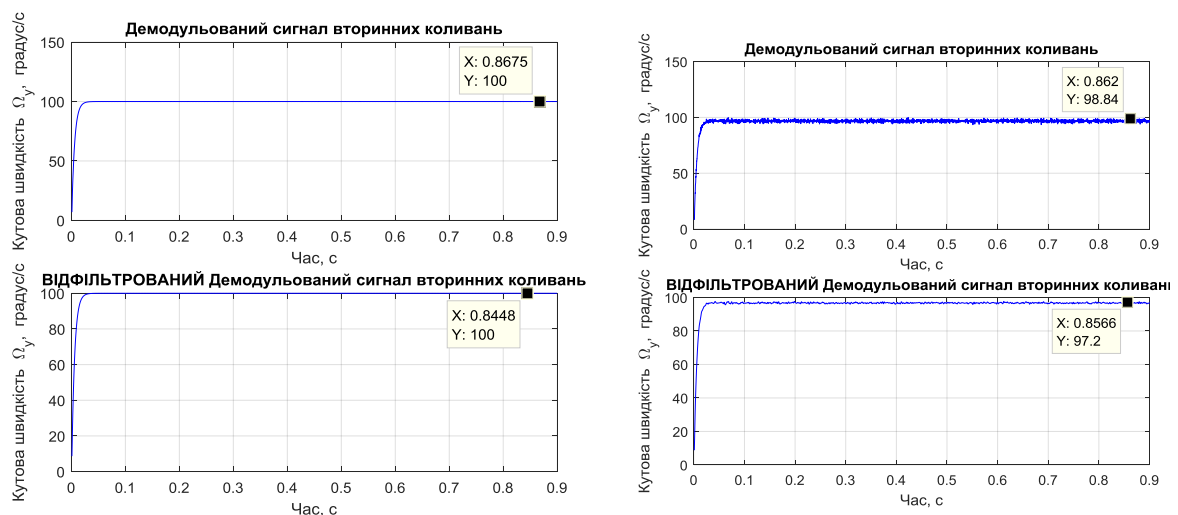


Рисунок 3.16. Сигнал на виході синхронного детектора одномасового ММГ при обертанні основи з сталою кут. швидкістю при дії зовн. прискорення

Таблиця 3.11. Вимірювання сталої кут. швидкості ММГ RR-типу із застосуванням синхронного детектора при дії сталого прискорення

Omega_y=100 °/с)		
Змінюваний параметр	Макс. відхилення ЧЕ по вторинних коливаннях	Демодульований сигнал вторинних коливань (після синхр. детектора)
Wz_const=1 м/с <sup>2</sup>	2.66592993085835e-05 -2.67407061419148e-05	100 °/с
Wz_const=10 м/с <sup>2</sup>	2.66592995022494e-05 -2.67407061617434e-05	(99,94) 99,93 °/с
Wz_const=20 м/с <sup>2</sup>	2.67407061824706e-05	99,85 °/с

	-2.66592997513282e-05	
Wz_const=50 м/с <sup>2</sup>	2.67407062473513e-05 -2.6659301744213e-05	99,61
Wz_const=70 м/с <sup>2</sup>	2.67407063090318e-05 -2.66593547616494e-05	99,45 °/с
Wz_const=100 м/с <sup>2</sup>	2.67582142620033e-05 -2.67582398117354e-05	99,24 °/с
Wz_const=150 м/с <sup>2</sup>	2.67662953105379e-05 -2.67653987201382e-05	(100,1) 99,05
Wz_const=200 м/с <sup>2</sup>	2.67798025685192e-05 -2.67810799894187e-05	(103,3) 98,89
Wz_const=250 м/с <sup>2</sup>	2.67884738550869e-05 -2.67889308860631e-05	(100,9) 98,95 °/с
Wz_const=300 м/с <sup>2</sup>	2.67923849435818e-05 -2.67933404865962e-05	(100,4) 99,04
Wz_const=350 м/с <sup>2</sup>	2.6796497292954e-05 -2.67966701136917e-05	(100,9) 98,15
Wz_const=450 м/с <sup>2</sup>	2.68119907203555e-05 -2.68111118768538e-05	(98,84) 97,2 °/с

4. Дослідження дії зовнішнього гармонічного прискорення зі змінюванням частоти (рис.3.17, таблиця 3.12).

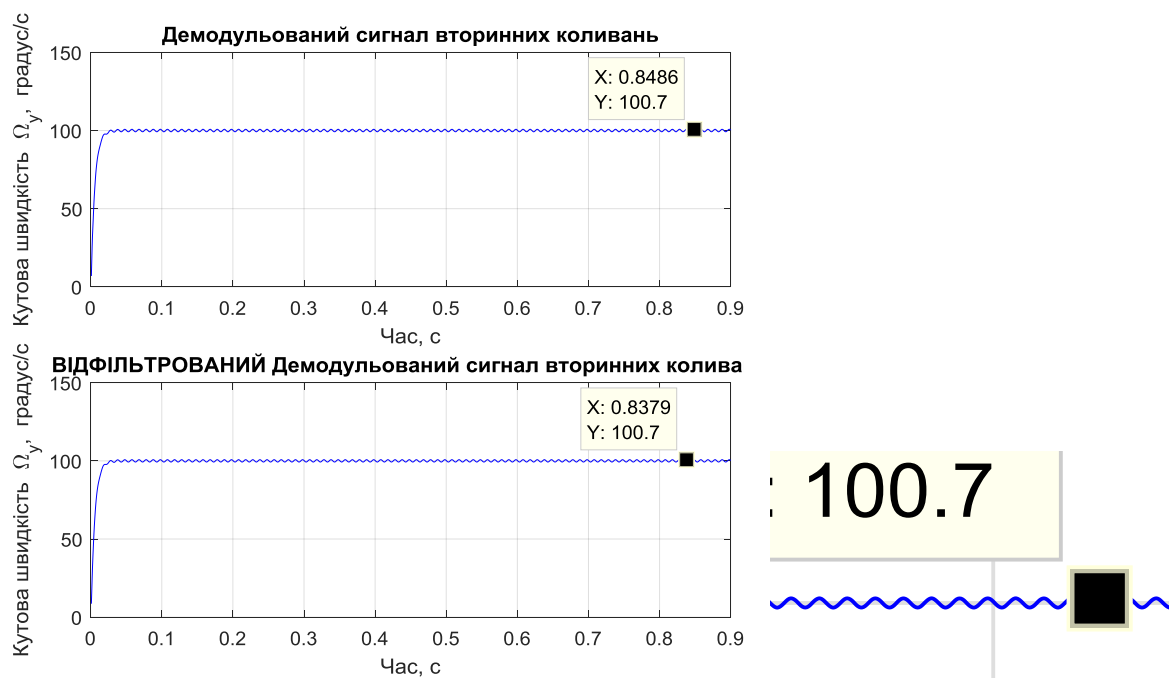


Рисунок 3.17. Сигнал на виході синхронного детектора одномасового ММГ при обертанні основи з сталою кут. швидкістю при дії гармонічного зовн. прискорення



Таблиця 3.12. Вимірювання сталої кут. швидкості ММГ RR-типу із застосуванням синхронного детектора при дії гармонічного прискорення

$\Omega_y = 100 \text{ }^\circ/\text{с},$		$Wz_{om\_max} = 100 \text{ м/с}^2$
Змінюваний параметр	Макс. відхилення ЧЕ по вторинних коливаннях	Демодульований сигнал вторинних коливань (після синхр. детектора)
$Wz_{freq} = 100 \text{ Гц}$	$2.67507160825523e-05$ $-2.67518923498747e-05$	100,7
$Wz_{freq} = 300 \text{ Гц}$	$2.67407061399318e-05$ $-2.66592993179682e-05$	(100,8) 100,4 $^\circ/\text{с}$
$\Omega_y = 100 \text{ }^\circ/\text{с},$		$Wz_{om\_max} = 300 \text{ м/с}^2$
$Wz_{freq} = 100 \text{ Гц}$	$2.67820884444566e-05$ $-2.67826928535057e-05$	(102,4) 102,2 $^\circ/\text{с}$
$Wz_{freq} = 300 \text{ Гц}$	$2.67727594496545e-05$ $-2.67741684146756e-05$	(102,4) 101,3 $^\circ/\text{с}$

**Висновок:** На виході синхронного детектора отримано сигнал, позбавлений від високочастотної складової, отриманий за допомогою демодуляції. Проведені модельні дослідження показали, що збурення, які викликані зовнішніми прискореннями, призводять до девіації (похибки) амплітуди вихідного корисного сигналу відносно ідеальних вимірювань – 2,5  $^\circ/\text{с}$ . Тобто похибка від дії зовнішнього прискорення на ММГ RR-типу при розузгодженні власних частот ІТ та РЕ на 10 % може сягати 2-3%, що є незадовільним результатом для такого класу ММГ.

Для підвищення точності вихідного інформативного сигналу ММГ при дії зовнішнього прискорення, використаємо модифікований двохмасовий ММГ, схема якого показана на Рисунку 3.18. Причому актуатор первинних коливань другого з ІТ ММГ живиться напругою у протифазі до напруги живлення першого ІТ.

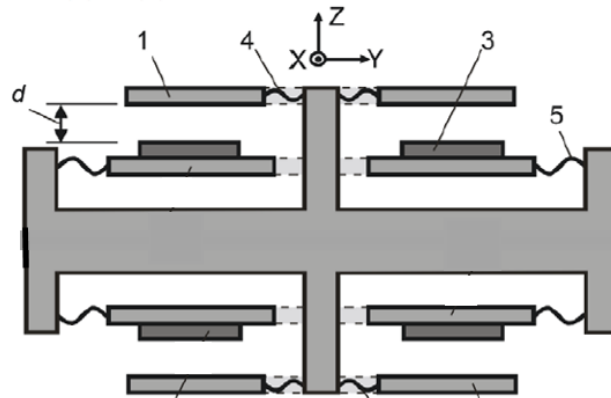


Рисунок 3.18 – Двохмасовий ММГ з електродами на пружному підвісі

1. Дослідження впливу постійної кутової швидкості на двохмасовий ММГ з синхронним детектором (рис.3.19, таблиця 3.13).

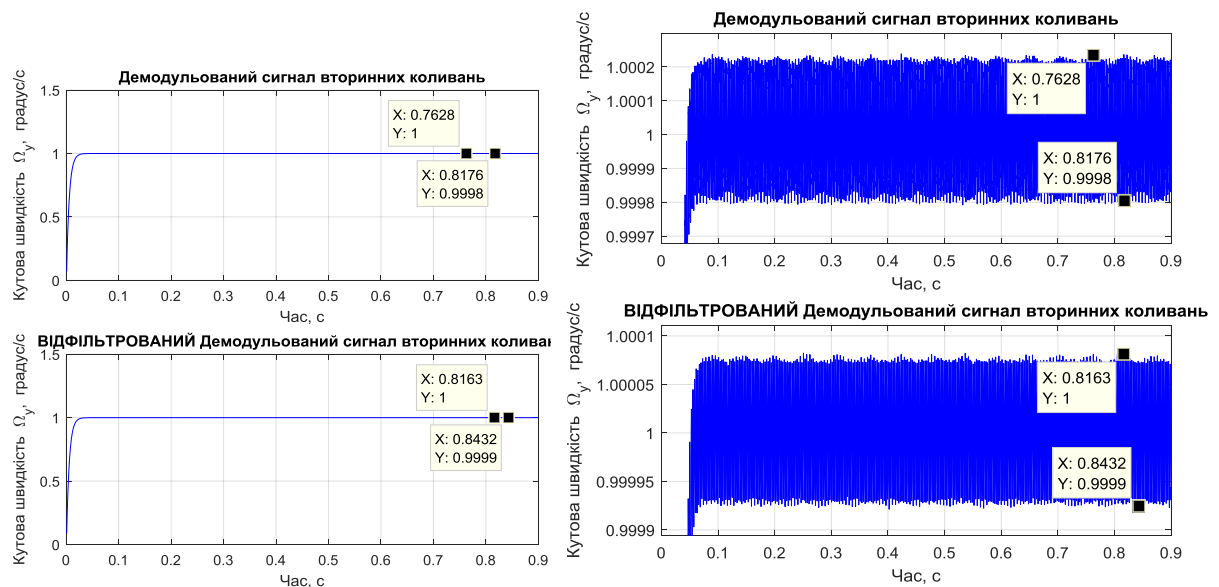


Рисунок 3.19. Сигнал на виході синхронного детектора реального двохмасового ММГ ( $\delta\omega = 10\%$ ) при обертанні основи з сталою кутовою швидкістю

Таблиця 3.13. Вимірювання постійної кутової швидкості двохмасовим ММГ RR-типу із застосуванням синхронного детектора

Змінюваний параметр	Макс. відхилення ЧЕ по вторинних коливаннях	Демодульований сигнал вторинних коливань (після синхр. детектора)
$\Omega_y = 1$ °/с	$2.66583025651937e-07$ $-2.67407185001203e-07$	$1 - 0,999$ °/с
$\Omega_y = 10$ °/с	$2.66583025603077e-06$	$10 - 9,999$ °/с

	-2.67407184997809e-06	
$\Omega_y = 50 \text{ }^\circ/\text{с}$	1.337035924989e-05 -1.33291512795915e-05	50 $^\circ/\text{с}$
$\Omega_y = 100 \text{ }^\circ/\text{с}$	2.67407061399318e-05 -2.66592993179682e-05	100 – 99,99 $^\circ/\text{с}$

2. Дослідження впливу змінної кутової швидкості на двохмасовий ММГ з синхронним детектором (рис.3.20, таблиця 3.14).

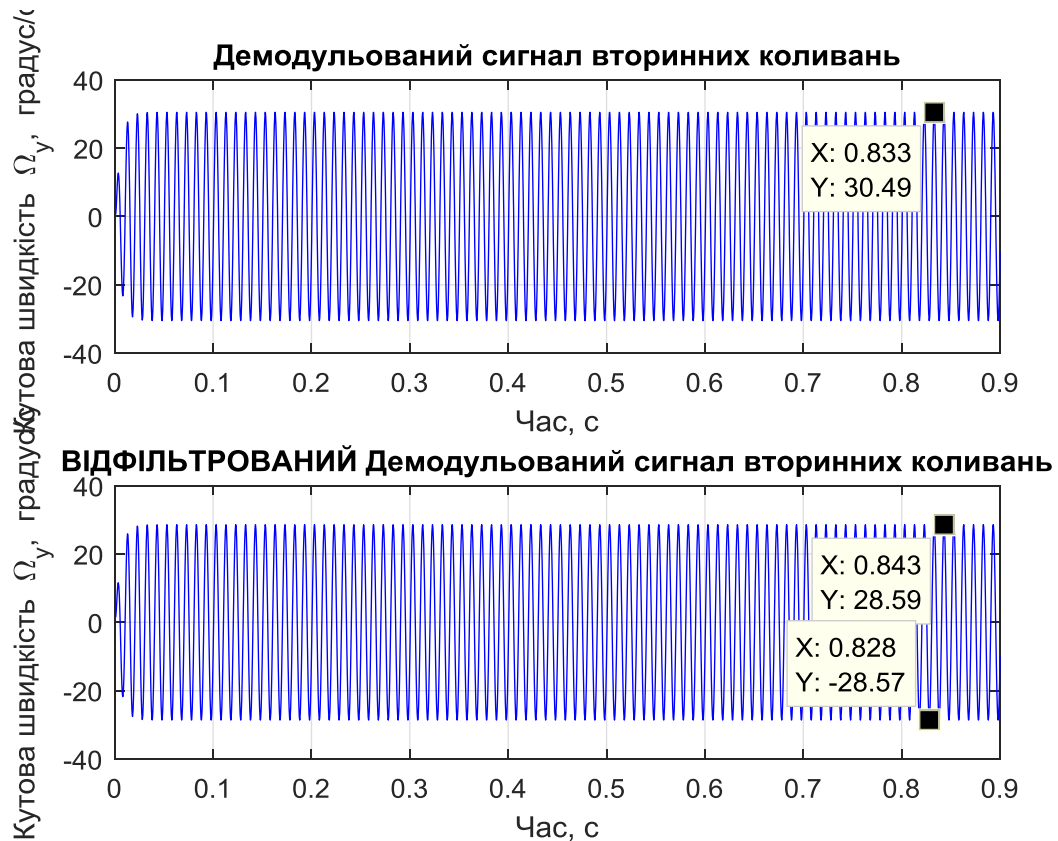


Рисунок 3.20. Сигнал на виході синхронного детектора реального двохмасового ММГ ( $\delta\omega = 10\%$ ) при обертанні основи з змінюваною кут. швидкістю

Таблиця 3.14. Вимірювання постійної кут. швидкості двохмасовим ММГ RR-типу із застосуванням синхронного детектора

	$\Omega_y = 0$ ,	$\Omega_{y \max} = 30 \text{ }^\circ/\text{с}$
Змінюваний параметр	Макс. відхилення ЧЕ по вторинних коливаннях	Демодульований сигнал вторинних коливань (після синхр. детектора)
$\Omega_{y \text{ freq}} = 1 \text{ Гц}$	8.02240939256973e-06 -8.02240891159401e-06	0, 30,01 $^\circ/\text{с}$

Omegay_freq=20 Гц	8.03978730563513e-06 -8.03975478929089e-06	0, 29,94 °/с
Omegay_freq=100 Гц	8.48151125848264e-06 -8.48150681299846e-06	0, 28,59 °/с
Omega_y=0, Omegay_max=100 °/с		
Omegay_freq=1 Гц	2.67413521800872e-05 -2.6741350582084e-05	0, 100,01°/с
Omegay_freq=20 Гц	2.67992744522642e-05 -2.67991659358627e-05	0, 99,28 °/с
Omegay_freq=100 Гц	2.8271599687598e-05 -2.82715980381926e-05	0, 95,31 °/с

3. Дослідження впливу дії постійного прискорення при вимірювання постійної кут. швидкості двохмасовим ММГ з синхронним детектором (рис.3.21, таблиця 3.15).

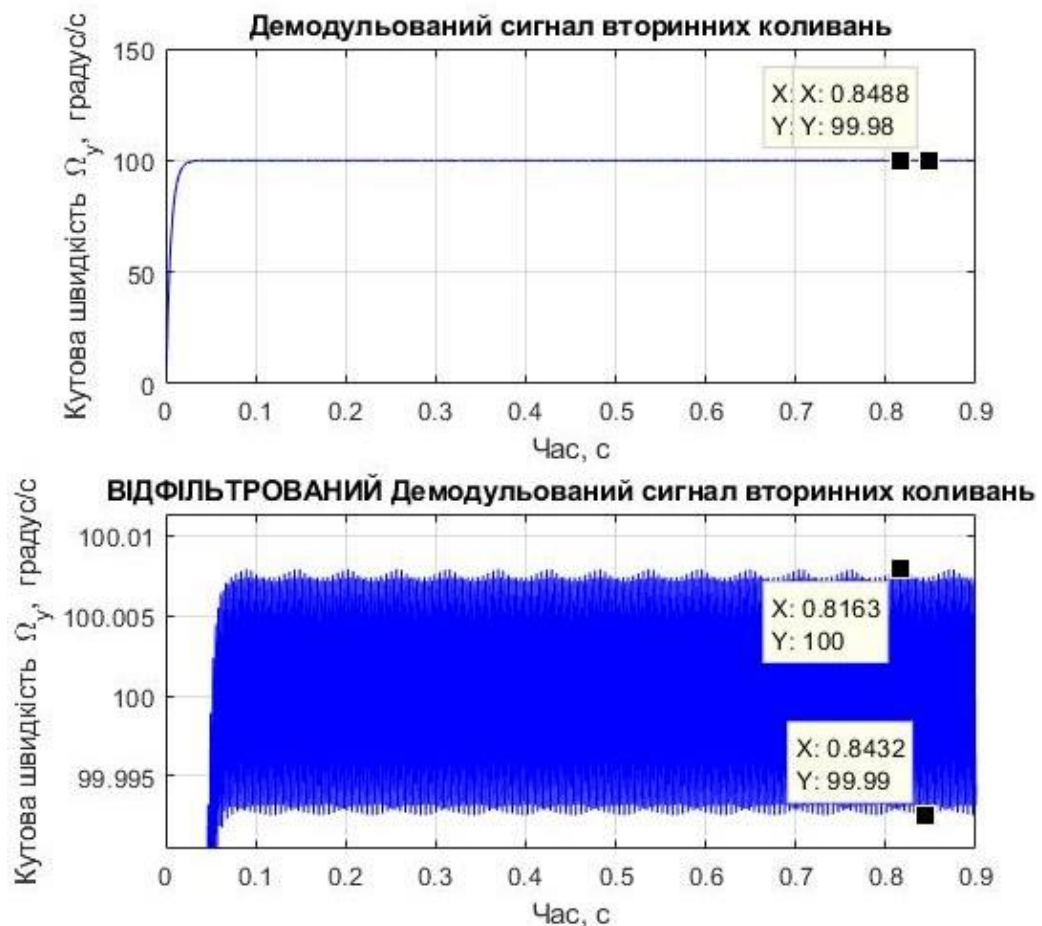


Рисунок 3.21. Сигнал на виході синхронного детектора реального двохмасового ММГ ( $\delta\omega=10\%$ ) при обертанні основи з сталою кут. швидкістю при дії постійного зовнішнього прискорення

Таблиця 3.15. Вимірювання постійної кут. швидкості двохмасовим ММГ RR-типу із застосуванням синхронного детектора при дії постійного зовнішнього прискорення

Omega_y=100 °/с		
Змінюваний параметр	Макс. відхилення ЧЕ по вторинних коливаннях	Демодульований сигнал вторинних коливань (після синхр. детектора)
Wz_const=1 м/с <sup>2</sup>	2.66592993085835e-05 -2.67407061419148e-05	100, 99,99 °/с
Wz_const=10 м/с <sup>2</sup>	2.66592995022494e-05 -2.67407061617434e-05	100, 99,99 °/с
Wz_const=20 м/с <sup>2</sup>	2.67407061824706e-05 -2.66592997513282e-05	100, 99,99°/с
Wz_const=50 м/с <sup>2</sup>	2.67407062473513e-05 -2.6659301744213e-05	100, 99,99°/с
Wz_const=70 м/с <sup>2</sup>	2.67407063090318e-05 -2.66593547616494e-05	100, 99,99°/с
Wz_const=100 м/с <sup>2</sup>	2.67582142620033e-05 -2.67582398117354e-05	100, 99,9 °/с
Wz_const=150 м/с <sup>2</sup>	2.67662953105379e-05 -2.67653987201382e-05	100,05, 100,1°/с
Wz_const=200 м/с <sup>2</sup>	2.67798025685192e-05 -2.67810799894187e-05	100, 100,4 °/с
Wz_const=250 м/с <sup>2</sup>	2.67884738550869e-05 -2.67889308860631e-05	100,2, 100,7 °/с
Wz_const=300 м/с <sup>2</sup>	2.67923849435818e-05 -2.67933404865962e-05	100, 100,6°/с
Wz_const=350 м/с <sup>2</sup>	2.6796497292954e-05 -2.67966701136917e-05	100, 100,9 °/с
Wz_const=450 м/с <sup>2</sup>	2.68119907203555e-05 -2.68111118768538e-05	100, 101,8 °/с

4. Дослідження дії зовнішнього гармонічного прискорення та частоти приведено у таблиці 3.16.

Таблиця 3.16. Вимірювання постійної кут. швидкості двохмасовим ММГ RR-типу із застосуванням синхронного детектора при дії змінюваного зовнішнього прискорення

Omega_y=100 °/с, Wz_om_max=100 м/с <sup>2</sup>		
Змінюваний параметр	Макс. відхилення ЧЕ по вторинних коливаннях	Демодульований сигнал вторинних коливань (після синхр. детектора)
Wz_freq=100 Гц	2.67507160825523e-05 -2.67518923498747e-05	100, 99,98 °/с
Wz_freq=300 Гц	2.67407061399318e-05 -2.66592993179682e-05	100, 99,99 °/с
Omega_y=100 °/с, Wz_om_max=300 м/с <sup>2</sup>		
Wz_freq=100 Гц	2.67820884444566e-05 -2.67826928535057e-05	100, 100,5 °/с
Wz_freq=300 Гц	2.67727594496545e-05 -2.67741684146756e-05	100, 100,4°/с

**Висновки:** З досліджень видно, що відхилення амплітуди інформативного сигналу суттєво зменшились, що підтверджує ефективність запропонованого способу підвищення точності ММГ RR-типу при дії зовнішнього прискорення.

### 3.3 Висновки по розділу 3

Ідеальний ММГ RR-типу являється нечутливим до поступальної вібрації та постійного прискорення. Однак, інструментальні похибки, наявність нелінійності, жорсткість пружного підвісу та розузгодження власних частот ІТ і РЕ призводить до появи відхилень амплітуд вихідного сигналу ДКШ.

Корисним сигналом гіроскопа є огинаюча вторинних коливань, що несе інформацію про діючу кутову швидкість. Оскільки вихідний сигнал ДКШ є високочастотними коливаннями на власній частоті первинних коливань гіроскопа, які амплітудно модулюються корисною складовою вимірюваної кутової швидкості. У роботі для усунення високочастотної складової вторинних коливань ММГ застосовано синхронний детектор. Дана схема показала свою високу ефективність і дала змогу ефективно проаналізувати вплив основних факторів на роботу розглядуваних схем ММГ.

Імітаційне моделювання впливу гармонічної вібрації за умови розузгодження власних частот ІТ та РЕ, при дії постійної та змінної кутової швидкості, показало що амплітуда вторинних коливань збільшується та з'являється зміщення нуля, при дії постійного прискорення та вібрації амплітуда вторинних коливань теж збільшується. Проведені модельні дослідження показали, що збурення, які викликані зовнішніми прискореннями, призводять до девіації (похибки) амплітуди вихідного корисного сигналу відносно ідеальних вимірювань до 2,5 °/с. Тобто похибка від дії зовнішнього прискорення на ММГ RR-типу при розузгодженні власних частот ІТ та РЕ на 10 % може сягати 2-3%, що є незадовільним результатом для такого класу ММГ.

У розділі запропоновано для підвищення точності вихідного інформативного сигналу ММГ при дії зовнішнього прискорення, використовувати модифікований двохмасовий ММГ з розробкою відповідної структурної схеми (Рисунок 3.18). Актуатор первинних коливань другого з ІТ ММГ живиться напругою у протифазі до напруги живленні першого ІТ. Моделювання роботи за-

пропонованої схеми показало, що відхилення амплітуди інформативного сигналу суттєво зменшились – приблизно у 40-60 раз, що підтверджує ефективність запропонованого способу підвищення точності ММГ RR-типу.



## **РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ КОМПЕНСАЦІЇ ПОХИБОК МІКРО- МЕХАНІЧНИХ ГІРОСКОПІВ»**

### **4.1 Опис ідеї проекту**

Пошук нових можливостей створення інерційних датчиків з необхідними характеристиками й прогрес в області мікроелектроніки привели до появи нового класу приладів – мікромеханічних гіроскопів (ММГ).

Розроблювані зразки ММГ характеризуються надмалими масою (частки грамів) і габаритами (одиниці міліметрів), низькою собівартістю (десятки USD на одну вісь вимірювань) і енергоспоживанням, високою стійкістю до механічного (ударні впливи до 105g ) і теплового впливу (від -40 до +85) достатньою точністю.

Мікромеханічні гіроскопи (ММГ) - одне з самих затребуваних застосувань в мікроелектромеханічній (MEMS) індустрії інтегральних датчиків за обсягами продажів (після акселерометрів і датчиків тиску). Затребуваність гіроскопів підтримується багатьма ринками - клієнтським, медичним, промисловим і військовим.

Інерційні навігаційні системи (ІНС) забезпечують високу короточасну точність оцінки місця розташування, орієнтації і швидкості. Забезпечення високої чутливості - одна з основних задач при розробці навігаційних інерціальних приладів, наприклад, ММГ. Проблеми створення мікромеханічних гіроскопів багатогранні. Найважливішими і найбільш складними є завдання точного зйому інформації в ММГ. Воно полягає у вимірюванні за допомогою ємнісних датчиків дуже малих амплітуд кутів чи переміщень вторинних коливань, які несуть інформацію про вимірювану кутову швидкість. Підвищення точності ММГ дозволить використовувати їх у нових областях цивільної та військової техніки, зокрема, для забезпечення навігації і управління малими рухомими об'єктами. Прикладами таких об'єктів є безпілотні літальні.

У таблиці 4.1 зображено зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 4.1. Опис ідеї стартап проекту

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди для користувача</i>
Підвищення точності мікромеханічного гіроскопу	1.Автомобільна промисловість	Виявлення крену машини і бічних перекидань.
	2.Військова техніка	Збільшення точності техніки
	3.Робототехніка	
	4.Медицина	

Висновок: в таблиці приведені основні напрямки застосувань запропонованого мікромеханічного гіроскопа. Цими споживачами є військова техніка, автомобільна промисловість, медичні установи, робототехніка та товари широкого вжитку.

Далі проводимо аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів (табл. 4.2)

Таблиця 4.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ n/ n	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конку- рент1	Конку- рент2	Конку- рент3			
1	Низькі витрати	15	50	35	40			+
2	Габаритні мкм	2*2	2*3	3*3	4*4		+	
3	Технологіч- ність	77%	50%	80%	60%			+
4	Підвищення то- чності		-	-	-			

Висновки: у порівнянні із головними конкурентами запропонований мною товар має ряд переваг – це вартість, використання інноваційних систем підвищення надійності та точності. Слід також звернути увагу, що даний товар

є технологічним. З точки зору виробництва це дає можливість стабільно отримувати високу якість та не нести збитків через неякісне виготовлення, і робити товар унікальним.

## 4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

За допомогою аудит технології можна реалізувати ідею проекту та технології його створення за такими складовими.

Таблиця 4.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ n/n	Ідея проєк- ту	Технології її реаліза- ції	Наявність те- хнологій	Доступність техно- логій
1.	Підви- щення стійкості та точності ММГ	Структурно-конс- труктивний метод	Наявна	Доступна
		Алгоритмічні або схемотехнічні ме- тоди підвищення вібро- і ударостій- кості	Наявна	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: щоб значно виділятися на ринку від конкурентів, необхідно за основу взяти другий пункт «Алгоритмічні методи», що потребує значних ресурсів на проведення дослідження та пода- льшу реалізацію.				

## 4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проєктів-конкурентів.

Проводиться аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл.4.4).

Таблиця 4.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

<i>№ n/ n</i>	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
1	Кількість головних гравців, од	4
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	50000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	сертифікація
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	відсутні
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	43%

Висновки: за результатами складеної таблиці можна сказати, що вихід на ринок є рентабельним. Мала кількість гравців свідчить про високий поріг входу на ринок через високу наукоємність, однак мала конкурентність грає в плюс проекту. Високий процент рентабельності дає змогу швидко відбити затрачені кошти на розробку.

Визначимо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та сформуємо орієнтовний перелік вимог до товару (табл. 4.5).

Таблиця 4.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
1	Зменшення масогабаритних характеристик та підвищення точності ММГ	Військова техніка, робототехніка, навігаційне устаткування, медицина, товари широкого вжитку	Особливості, викликані зі специфікою проведення дослідів, необхідність модифікування програмно-алгоритмічного забезпечення, інтеграція із існуючими системами	Висока точність та стабільність результатів

Висновки: формування ринку визначається потребою підвищення точності ММГ та подальшого аналізу даних. Основними споживачами цього продукту є сфери, що тією чи іншою мірою стосуються здатності реагувати на зміни кутової орієнтації тіла, а саме сфери медичної інженерії, військова техніка, робототехніка, навігаційне устаткування, товари широкого вжитку.

Аналіз ринкового середовища. В табл.4.6 наведені фактори, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та фактори, що йому перешкоджають(табл.4.7).

Таблиця 4.6. Фактори загроз

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1.	Конкуренція	Менша ціна у конкурента при однаковій якості продукту	Відтік клієнтів
2.	Економічний	Економічний стан країни-виробника	Відмова від продукту
3.	Якість	Не належна якість зібраного приладу	Відмова від продукту
4.	Вартість комплектуючих	Підвищення закупівельної вартості комплектуючих	Пошук нових постачальників, зміна матеріальної бази
5.	Патентні позови	Позови від компаній конкурентів	Відстоювання прав компанії.

Висновки: головним фактором, що сприяє впровадженню проекту, є конкуренція. Вже існуючі товари на ринку мають певну репутацію та великі об'єми виробництва, можливість демпінгувати ціни для отримання нових клієнтів свого товару.

Таблиця 4.7. Фактори можливостей

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1.	Збільшення попиту	Різне збільшення зацікавленості до системи	Підвищення виробництва

2.	Необхідність до інтеграції	Необхідність додати можливість розширення системи	Компанія може створити додаткові можливості системи на замовлення
3.	Освоєння нових сфер	Система використовується у сферах, що не розглядалися виробником	Створення спеціальної робочої групи задля модернізації приладу для виконання поставлених вимог
4.	Співпраця з конкурентами	Конкурент запропонував кооперацію	Оцінки можливих ризиків

Висновки: ринок клієнтів постійно зростає. Збільшення зацікавленості в товарі призведе до різкого збільшення об'єму виробництва та продажів, що дасть поштовх до нових вдосконалень. Це досягається шляхом рекламування

Проведемо аналіз пропозиції шляхом визначення загальних рис конкуренції на ринку (табл.4.8).

Таблиця 4.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
1. Вказати тип конкуренції - чиста конкуренція	Мала кількість постачальників даного продукту	- відповідність ринку - прогнозування - випереджати існуючі технології
2. За рівнем конкурентної боротьби міжнародний	Наявність замовників із інших держав	Міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою - міжгалузева	Використання у різних галузях	Робота менеджменту і реклами по залученню клієнтів
4. Конкуренція за видами товарів:- товарно-видова	Товар, що пропонується є одного виду	Клієнтко-орієнтована стратегія розвитку Адаптивність до умов ринку
5. За характером конкурентних переваг - цінова	Вартість залежить від комплектації та функціоналу	Пошук вигідного постачальника компонентів
6. За інтенсивністю - марочна	Вибір постачальника по бренду	Розкрутка бренду, його рекламування

Висновки: на ринку присутня велика конкуренція через те, що окремі гравці не можуть впливати на ціну товару. За рівнем конкурентної боротьби – міжнародний із міжгалузевою ознакою. Конкуренція за видами товарів – ви-дова.

Необхідний більш детальний аналіз умов конкуренції (табл.4.9) та перелік факторів конкурентоспроможності (табл.4.10).

Таблиця 4.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

<i>Складові аналізу</i>	<i>Прямі конкуренти в галузі</i>	<i>Потенційні конкуренти</i>	<i>Постачальники</i>	<i>Клієнти</i>	<i>Товари-замінники</i>
	Analog Devices, Motorola	Boeing North American	Rockwell International Corporation	Клініки, воєнна техніка	Інші МЕМС пристрої
<i>Висновки:</i>	Конкуренція є відносно не великою	Вихід на ринок відносно простий. Наявні потенційні конкуренти.	Постачальники мають не диктувати ціни на ринку	Клієнти не диктують умови через велику зацікавленість до товару	Обмежень практично немає

Таблиця 4.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

<i>№ п/п</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)</i>
1	Надійність	Використання алгоритмів із підвищеною завадостійкістю
2	Збільшення попиту	Різде збільшення зацікавленості до системи
3	Захищеність	Використання в агресивних середовищах

Висновки: оцінено основні фактори конкурентоспроможності. Підвищення надійності та завадостійкості системи досягається шляхом використання алгоритмів із підвищеною завадостійкістю. Простота у використанні приладу та налаштуванні робить його більш привабливим для клієнта через те, що необхідно тратити мінімум часу на налагодження та запуск.

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл.4.10) проведемо аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл.4.11)

Таблиця 4.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ n/ n	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з Analog Devices						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Надійність	18	+						
2	Простота	15				+			
3	Адаптивність	17	+						
4.	Ціна	14						+	

Висновки: запропонований товар має більший рейтинг відносно прямих конкурентів. Дана таблиця показує якими саме особливостями розроблена система відрізняються від аналогів та в яку саме сторону

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT- аналізу.

Таблиця 4.12. SWOT- аналіз стартап-проекту

<p><i>Сильні сторони:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>вища завадостійкість</li> <li>простота використання</li> <li>адаптивність</li> <li>стабільна робота,</li> <li>простота використання.</li> </ol>	<p><i>Слабкі сторони:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>своєчасне оновлення мат. бази,</li> </ol> <p>відносно нове ПЗ може мати недоліки</p>
<p><i>Можливості:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Збільшення продаж;</li> <li>Отримання державних замовлень на отримання послуг;</li> <li>Вихід на міжнародний ринок;</li> <li>Індивідуальне замовлення.</li> </ol>	<p><i>Загрози:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>конкуренція,</li> <li>Економічна нестабільність</li> <li>Якість продукту</li> <li>Вартість комплектуючих</li> <li>Патентні позови</li> </ol> <p>сертифікація.</p>

На основі SWOT- аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів (табл.4.13).



Таблиця 4.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

<i>№ п/п</i>	<i>Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки</i>	<i>Ймовірність отримання ресурсів</i>	<i>Строки реалізації</i>
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу	Середня	7міс
2	Стратегія компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями	Висока	10міс
3	Суперництво	Нижче середнього	12міс.

З зазначених альтернатив обираю стратегію компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями.

#### 4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл.4.14).

Таблиця 4.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

<i>№ п/п</i>	<i>Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів</i>	<i>Готовність споживачів сприйняти продукт</i>	<i>Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)</i>	<i>Інтенсивність конкуренції в сегменті</i>	<i>Простота входу у сегмент</i>
1.	Промислові компанії	+		Середня	-
2.	Медичні установи			Низька	+
3.	Воєнна техніка			Низька	+
4.	Робототехніка			Низька	+

Які цільові групи обрано: під час вибору цільової групи до уваги бралось в першу чергу готовність споживача сприйняти продукт. Промислові компанії та воєнна техніка потребують більш популярних роз'яснень щодо можливостей використання таких систем. У випадку успішної реклами є можливість зайняти нішу.

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку (табл.4.15).

Таблиця 5.15. Визначення базової стратегії розвитку

<i>№ п/ п</i>	<i>Обрана альтернатива розвитку проекту</i>	<i>Стратегія охоплення ринку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи</i>	<i>Базова стратегія розвитку*</i>
	Індивідуалізм	Стратегія недиференційованого маркетингу	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Адаптація до вимог ринку</li> <li>- Використання новацій</li> <li>- Генерування ноу-хау</li> </ul>	Стратегія спеціалізації

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл.4.16).

Таблиця 4.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

<i>№ п/п</i>	<i>Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i>	<i>Стратегія конкурентної поведінки*</i>
	Не є першопрохідцем	Буде шукати нових споживачів із поступовим переманюванням від конкурентів	Компанія буде вдосконалювати наявні зразки	Стратегія виблику лідера

Висновок: оскільки проект не є першопрохідцем та має суттєві переваги по відношенню до свого прямого конкурента, можливо обрати стратегію виклику лідеру. Це є можливим на фоні використання інноваційних методів підвищення точності алгоритмічного забезпечення.

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника та до продукту, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробимо стратегії позиціонування, що полягає у формуванні ринкової позиції.

Таблиця 4.17. Визначення стратегії позиціонування

<i>№ n/ n</i>	<i>Вимоги до товару ці- льової ауди- торії</i>	<i>Базова страте- гія розви- тку</i>	<i>Ключові конкурен- тоспроможні по- зиції власного ста- ртап-проекту</i>	<i>Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну по- зицію власного проекту (три ключових)</i>
1	Швидкість та точність роботи	Стратегія спеціалізації	Дослідження та розвиток	Високошвидкісна, легкість, надійність
2	Висока стабільність результатів	Стратегія спеціалізації	Якість	високоточна

Висновки: На ряду із використання інноваційних методів підвищення точності, проект повинен викликати асоціації у клієнта у гнучкості налаштування та комплексування, можливості після продажного обслуговування та високої якості виготовлення.

## 4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Для формування маркетингової концепції товару, потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
------------------	----------------	---------------------------------------	---

	Необхідність підвищення точності роботи ММГ	Відносно дешева та надійна системи, що здатна реагувати на зміни кутової орієнтації	Ціна, надійність, простота, підтримка, низькі масогабаритні характеристики
--	---	---	--

Висновки: в результаті визначення переваг концепції товару можливо створення цільової реклами товару та донесення цільового повідомлення до кінцевого клієнта.

Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару: уточнюється ідея продукту і послуг, його фізичні складові, особливості процесу його настання.

Таблиця 4.19. Опис трьох рівнів моделі товару

<i>Рівні товару</i>	<i>Сутність та складові</i>		
I. Товар за за-думом	Засіб дає можливість користувачеві оцінити відносне поло-ження тіла в просторі та вимірювати кутову швидкість		
II. Товар у реал-ьному вико-нанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Малогабаритність	6,4*10^-6	Тх технічна влас-тивість
	2. Швидкість роботи	70Гц	Ор-організаційна
	3. Точність	0,1°СКВ	Е -економічна
	4. Надійність	IP67	Тл-технологічна властивість
	5. Вартість	50	Вр виробнича
	Якість: відповідає нормам ДСТУ2499:2017		
	Пакування: програмне забезпечення записане на компакт диск.		
III. Товар із пі-дкріпленням	До продажу: комплектація максимальна		
	Після продажу: гарантія, сервісне обслуговування		
Захист товару: патентування, заходи захисту програмного та апаратного забез-печення.			

Висновки: Патентування програмних та апаратних рішень є основним засобом захисту.

Таблиця 4.20. Визначення меж встановлення ціни

<i>№ n/n</i>	<i>Рівень цін на товари-замін- ники</i>	<i>Рівень цін на товари-аналоги</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i>	<i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i>

Висновки: обрано середню цінову категорію.

Таблиця 4.21. Формування системи збуту

<i>№ n/n</i>	<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати пос- тачальник товару</i>	<i>Глибина ка- налу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
	Продаж	Повний супровід то- вару до замовника	Нульового рівня	Безпосеред- ній (прямий)

Висновки: основними каналами збуту є продаж.

Таблиця 4.22. Концепція маркетингових комунікацій

<i>№ n/n</i>	<i>Специфіка поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Канали комуні- кацій, якими користуються цільові клієнти</i>	<i>Ключові позиції, обрані для пози- ціонування</i>	<i>Завдання реклам- ного пові- домлення</i>	<i>Концепція реклам- ного звер- нення</i>
	Зовнішні об- ставини спо- нукають спо- живача до пошуку рі- шення	- Реклама - SMM - сайт вироб- ника	- Високош- видкісна - Легкість - надійність	Донесення можливос- тей отри- мання прибутку за допомо- гою цього засобу	Показ мо- жливостей даної сис- теми та можли- вість за- стосу- вання

Висновки: Маркетингова комунікація проходить через рекламу приладу в соціальних мережах, спортивних заходах, рекламі комп'ютерних ігор чи кінофільмів, а також безпосереднє ведення переговорів з компаніями-замовниками. Метою цих оголошень є донесення можливостей даної системи та вигоди від використання.

## 4.6 Висновки

Даний розділ присвячений розробленню першого етапу створення стартап-проекту. Найголовнішим в проведенні будь-якої наукової роботи є подальша комерціалізація отриманих результатів та можливість застосування розробленої концепції в промисловості. Більшість ідей в тій чи іншій мірі впливають на економічну складову підприємства. Тому розроблена ідея може бути використана як бізнес модель та може бути продана зацікавленим особам.

Наступним кроком проводився технологічний аудит проекту. Під час аудиту автор отримує можливість до розуміння кращої технології виконання. Виявлено що більшість технологій вже існує, однак використання останніх не дасть можливості мати переваги над конкурентами. Саме ставка на інноваційні методи підвищення точності можуть зробити пристрій унікальним та незамінним. Загалом, створення проекту можливе, однак необхідно провести доволі сильну рекламну компанію, щоб отримати покупців.

Зважаючи на стрімкий розвиток технологій, для швидкого отримання ресурсів та прибутків, слід обрати кооперацію, як форму ринкового впровадження проекту. Тобто, для того щоб встигнути за ринком, слід не розроблювати систему з нуля, оскільки це займе доволі багато часу, а запропонувати лідерам ринку використання запропонованих програмних рішень. Звісно, це є альтернативою, оскільки в такому випадку ні одна зі сторін не отримає повного прибутку.

Після аналізу всіх аспектів ринку, подальша імплементація проекту можлива. Але є одна важлива умова. Слід провести доволі сильну рекламну компанію, та донести до споживачів необхідність використання системи саме з підвищеною завадостійкістю та чому саме обрати нашу систему.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Ковальов А. С. Управление первичными и вторичными колебаниями микромеханического гироскопа: дис. ... кандидата технических наук: 20.02.08/ Ковальов Андрей Сергеевич. – Санкт-Петербург, 2008. – 158 с.
- 2) Сысоева С. Автомобильные гироскопы / С. Сысоева//Компоненты и технологии.– 2007. — No. 1. – С. 58 – 66.
- 3) Тимошенко С. П. Применение МЭМС-сенсоров в системах навигации и ориентации подвижных объектов / С.П. Тимошенко, А.П.Кульчицкий // Известия вузов. Электроника. – 2012. - №6 . - С.51-56.
- 4) Распопов В. Я. Микромеханические приборы: учебное пособие/В.Я. Распопов.- М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
- 5) Пяташев Е.Н. Микросистемы в аэрокосмической технике // Материалы V Международной научно-технической конференции.-СПб, 2006.
- 6) Лаборатория нано- и микросистемной техники при Санкт-Петербургском Государственном Политехническом Университете: [Электронный ресурс]: Публикации и сообщения – Электронная статья – Режим доступа к ст.: <http://www.mems.ru/public.php>
- 7) Yazdi N. Micromachined inertial sensors. / N. Yazdi, F. Ayazi, K. Najafi// IEEE Prociding.- 1998.- №86.-pp.1640–1659.
- 8) Geen J.A. Single-chip surface micromachined integrated gyroscope with 50°/h Allan Deviation /J.A. Geen [et. al.] // IEEE J. Solid-State Circuits.- 2002.- №37-pp. 1860–1866.
- 9) Lai S. A CMOS-MEMS Single-Chip Dual-Axis Gyroscope /S. Lai, J.Kiang // Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology, Taipei, Taiwan.- 21–23 October 2009.- pp. 305–307.
- 10) Boxenhorn B. A Vibratory Micromechanical Gyroscope/ B.Boxenhorn, P. Greiff // Proceedings of the AIAA Guidance and Controls Conference, Minneapolis, Minnesota. -15–17 August 1988.- pp. 88–4177.

- 11) Armenise M.N. *Advances in Gyroscope Technologies* / M.N. Armenise [et. al.] - Berlin: Springer, 2011.-321
- 12) Shakoor R.I. Electrothermally actuated resonant rate gyroscope fabricated using the MetalMUMPs /R.I. Shakoor [et. al.] // *Microelectron. J.* - 2011.-№42.- pp. 585–593.
- 13) Liu K. The development of micro-gyroscope technology /K. Liu [et. al.] // *J. Micromech. Microeng.*-2009.- №19-pp.1–29.
- 14) Xia D., The development of micromachined gyroscope structure and circuitry technology/ D. Xia, C. Yu, L. Kong // *Sensors (Switzerland)*- 2014.- Volume 14, Issue 1 (1). - pp.1394-1473.
- 15) Acar C., *MEMS Vibratory Gyroscope: Structural Approaches to Improve Robustness* / C. Acar, A. Shkel -Berlin: Springer.-2009. – 262 p.
- 16) Joo J.W. Deformation behavior of MEMS gyroscope sensor package subjected to temperature change /J.W. Joo, S.H. Choa // *IEEE Transaction Components and Packaging Technology.*- 2007.- vol. 30, no. 2 (6) -pp. 346–354.
- 17) Alper S. A single-crystal silicon symmetrical and decoupled MEMS gyroscope on an insulating substrate /S. Alper, T. Akin// *J. Microelectromech. Syst.*- 2005.- vol. 14, №. 4 (8) - pp. 707–717.
- 18) Li W. Y. Error sources in micromachined comb-drive turning-fork gyroscope. / W.Y. Li, A. W. Ruan, J. S. Luo // *J. Astron. Astron. Sinica Ser. B.*- 1999.- vol. 20, no. 3. - pp. 426–429.
- 19) Ashwin A. S. Integrated micromechanical resonant sensor for inertial measurement system.: Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng. Comput. Sci., Univ. California Berkeley, Berkeley, CA, USA, 2002.
- 20) Wyatt O. D., *Mechanical analysis and design of vibratory micromachined gyroscopes.*: Ph.D. dissertation, Dept. Mech. Eng., Univ. California Berkeley, Berkeley, CA, USA, 2001.



21) Fang J. C. Improved temperature error model of silicon MEMS gyroscope with inside frame driving./ J.C. Fang, J. L. Li, W. Sheng [et. al.] // J. Beijing Univ. Aeronautics Astron.- 2006.- vol. 32 (12).-pp. 1277–1280.

22) Feng R. A theoretical and experimental study on temperature dependent characteristics of silicon MEMS gyroscope drive mode /R. Feng, A. P. Qiu, Q. Shi, Y. Su //Adv. Mater. Res.- 2011.- vol 4 (11).- pp. 4237–4243.

23) Тимошенков С. П. Применение модифицированного уравнения Гиббса для задач исследования отказов изделий микросистемной техники / С.П.Тимошенков [и др.] // Известия вузов. Электроника. Том 21 – 2016. - №1 . - С.28-37.

24) Тимошенков С. П. Об эквивалентности физико-вероятностного и физико-статистического подходов к построению моделей надежности на примере деградации механических элементов МЭМС / С.П. Тимошенков [и др.] // Известия вузов. Электроника. Том 20 – 2015. - №2 . - С.203-206.

25) Нестеренко Т.Г. Влияние типовых дефектов на динамические характеристики микромеханического гироскопа LL-типа / Т.Г. Нестеренко, М.В. Пересветов // Авиакосмическое приборостроение. – 2012. – №4. – С.3-10.

26) Мухуров Н. И. Упругие элементы в микроэлектромеханических системах / Н.И. Мухуров, Г. И. Ефремов, С. П. Жвавый // Нано- и микросистемная техника. - 2008.- № 12. - С. 12—22.

27) Драгунов В. П. Электростатические взаимодействия в МЭМС с плоскопараллельными электродами. Часть I. Расчёт ёмкостей / В.П. Драгунов Д. И. Остертак // Нано- и микросистемная техника. – 2010. – №7. – С. 37 – 41.

28) Драгунов В. П. Электростатические взаимодействия в МЭМС с плоскопараллельными электродами. Часть II. Расчёт электростатических сил /В.П. Драгунов, Д. И. Остертак // Нано- и микросистемная техника. – 2010. – №8. – С. 40–47.

29) Димитров Д. Радиационная стойкость модулей МЭМС /Д. Димитров, Н. Данилин, И. Сабилов // «Современная электроника». – 2011 - №1. - С. 10-11.

30) Унтилов А.А. Исследование и разработка упругого подвеса чувствительного элемента микромеханического гироскопа: Диссертация канд. техн. наук: 05.11.03/ Унтилов Александр Алексеевич.-Санкт Петербург., 2005- 148 с.

31) Унтилов А.А. Исследование и разработка упругого подвеса чувствительного элемента микромеханического гироскопа: Диссертация канд. техн. наук: 05.11.03/ Унтилов Александр Алексеевич.-Санкт Петербург., 2005- 148 с.

32) Евстифеев М.И. Требования к точности изготовления упругого подвеса микромеханического гироскопа/М.И. Евстифеев, А.А Унтилов // Гироскопия и навигация. - 2003. - № 2. - С.-.24-31.

33) Евстифеев М.И., Влияние технологических погрешностей на упругие характеристики микромеханического гироскопа /М.И. Евстифеев, А.А. Унтилов // Гироскопия и навигация.–2002.-№4.–С.41-42

34) Джашидов В.Э. Влияние температурных и технологических факторов на точность микромеханических гироскопов / В.Э. Джашидов [и др.] // Гироскопия и навигация. – 1999. - №3. – С. 3-16.

35) Джашидов В.Э. Расчет температурных и технологических погрешностей микромеханических гироскопов / В.Э. Джашидов [и др.] // Нано- и микросистемная техника: Сб. статей.- М., Техносфера, 2005 –С. 342-357.

36) Евстифеев М.И. Критерий качества и вопросы оптимизации конструкций микромеханических гироскопов RR-типа /М.И. Евстифеев, И.Б. Челпанов // Гироскопия и навигация.- 2012. - №1. – С.122-132.

37) Тимошенков С. П. Распределение температуры по длине термомеханического актюатора / С.П. Тимошенков [и др.] // Известия вузов. Электроника. Том 20 – 2015. - №4 . - С.397-404.

38) Fang J. C. Improved temperature error model of silicon MEMS gyroscope with inside frame driving./ J.C. Fang, J. L. Li, W. Sheng [et. al.] // J. Beijing Univ. Aeronautics Astron.- 2006.- vol. 32 (12).-pp. 1277–1280.

39) Xia D. Microgyroscope Temperature Effects and Compensation-Control Methods / D. Xia [et. al] // IEEE Sensors Journal.- 2009.-№9.- pp. 8349-8376.

40) Chiu S. R. An Integrated Thermal Compensation System for MEMS Inertial Sensors / S.R. Chiu [et. al] // IEEE Sensors Journal.-2014.-№14.- pp. 4290-4311.

41) Cao H. A Novel Temperature Compensation Method for a MEMS Gyroscope Oriented on a Periphery Circuit / H. Cao [et. al] // International Journal of Advanced Robotic Systems.- 2013.- Vol. 10.- pp.1-10.

42) Shcheglov K. Temperature dependent Characteristics of the JPL Silicon MEMS Gyroscope / K. Sheglov [et. al] // IEEE Aerospace Conference Proceedings.- 2000.- Volume 1.- P. 403-411

43) Wang X. Temperature Drift Compensation for Hemispherical Resonator Gyro Based on Natural Frequency/ X. Wang [et. al] // Sensors.-2012.- №12.- pp. 6434-6446.

44) Челпанов И.Б. Вопросы обеспечения стойкости микромеханических гироскопов при механических воздействиях / И.Б. Челпанов, М.И. Евстифеев // Гироскопия и навигация.- 2011.- №1.- С. 37-48.

45) Евстифеев М.И. Исследование электромеханической модели ММГ RR-типа с учётом вибрации основания / М.И. Евстифеев, А.С. Ковалёв, Д.П. Елисеев // Гироскопия и навигация.- 2013.- №3.-С. 37-46.

46) Лестев А.М. О комбинационных резонансах в динамике ММГ/А.М. Лестев // Гироскопия и навигация.- 2014.- №3.- С. 53-58. 47) Евстифеев М.И. Критерий качества и вопросы оптимизации конструкций микромеханических гироскопов RR-типа /М.И. Евстифеев, И.Б. Челпанов // Гироскопия и навигация.- 2012. - №1. – С.122-132.

48) Евстифеев М.И. Анализ прочности упругих подвесов микромеханических гироскопов /М.И. Евстифеев, Д.В. Розенцвейн, И.Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. - 2009. - №.3 - С.22-34.

49) Евстифеев М.И. Анализ контактных взаимодействий в микромеханических гироскопах /М.И. Евстифеев, Розенцвейн Д.В. // Научно- технический вестник СПбГУ ИТМО. - 2010.- №4. – С.46-50.

50) Евстифеев М.И. Оптимизация расположения упоров в микромеханическом гироскопе /М.И. Евстифеев, Д.В. Розенцвейн // Научно- технический вестник СПбГУ ИТМО, - 2010.- №4. – С.93-96.

51) Geen J. Progress in Integrated Gyroscopes // IEEE A&E Systems magazine – November, 2004. pp. 12-17.

52) Acar C., Shkel A. MEMS Vibratory Gyroscopes. Structural Approaches to Improve Robustness /Springer Science. – 2009 – 262 p.

53) Евстифеев, М.И. Вопросы обеспечения стойкости микромеханических гироскопов при механических воздействиях / М.И. Евстифеев, И.Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. – 2013. – № 1. – С.119-133.

54) Некрасов, Я.А. Улучшение эксплуатационных характеристик отечественного микромеханического гироскопа RR-типа / Я.А.Некрасов [и др.] // Материалы XXI Санкт-Петербургской межд. конф. по интегрированным навигационным системам. – 2014. – С. 226-235.

55) Евстифеев, М.И. Исследование электромеханической модели микромеханического гироскопа R-R типа с учетом вибраций основания / М.И. Евстифеев, А.С. Ковалев, Д.П. Елисеев // Гироскопия и навигация. – 2013. – № 3. – С. 24-32.

56) Barbour, N. Inertial MEMS System Applications /N. Barbour [et al.]// Advances in Navigation Sensors and Integration Technology. RTO LECTURE SERIES 232. – 2004. – pp.7-1–7-12.

57) Патент 2447403 РФ, МПК G01C 19/56. Микромеханический гироскоп // Я.А. Некрасов; заявл.07.12.2010; опубл. 10.04.2012; Бюл. № 10. – 10 с.

58) Евстифеев, М.И. Результаты испытаний микромеханических гироскопов при механических воздействиях / М.И. Евстифеев, Д.П. Елисеев, А.С. Ковалев, Д.В. Розенцвейн // Гироскопия и навигация. – 2011. – № 1. – С. 49-58.

59) Udovenko, V.A. On the Formation of High Damping State and Optimization of Structure of Industrial Damping Steels / V.A. Udovenko [et al.] // Solid State Phenomena. – 2008. – vol. 137. – pp.119-128.

60) Берштам, Я.Н. Исследование сплавов с высоким внутренним демпфированием в конструкции микромеханического гироскопа / Я.Н. Берштам, М.И. Евстифеев, Д.П. Елисеев // Материалы XXIX конференции памяти Н.Н. Острякова. – 2014. – С. 65-72.

61) Lestev M.A. The influence of nonlinear factors on dynamics and accuracy of micromechanical gyroscopes// Proceedings of 14th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. – 2007. – pp.24-25.

62) Евстифеев, М.И. Анализ контактных взаимодействий в микромеханических гироскопах /М.И. Евстифеев, Д.В. Розенцвейн // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2010. – № 4. – С. 46-50.

63) Евстифеев, М.И. Использование многомассовых систем для повышения вибростойкости микромеханических гироскопов / М.И. Евстифеев, Д.В. Розенцвейн // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2009. – № 1. – С.40-44.

64) Weinberg, H. Gyro Mechanical Performance: The Most Important Parameter // Technical Article MS-2158. Analog Devices, Inc. – September 2011. – pp. 1-5.

65) Кучерков С.Г., Шадрин Ю.В. К вопросу о выборе конструктивных параметров микромеханического кольцевого гироскопа вибрационного типа // Материалы III конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». – СПб: ЦНИИ «Электроприбор», 2001. – С.94-101.

66) Geen J. Progress in Integrated Gyroscopes // IEEE A&E Systems magazine. – November, 2004. – P. 12–17.

67) Евстифеев, М.И. Вопросы обеспечения стойкости микромеханических гироскопов при механических воздействиях /М.И. Евстифеев, И.Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. – 2013. – №1. – С.119-133.

68) Евстифеев, М.И. Исследование электромеханической модели микромеханического гироскопа R-R типа с учетом вибраций основания /М.И. Евстифеев, А.С. Ковалев, Д.П. Елисеев// Гироскопия и навигация. – 2013. – №.3. – С.24-32.

69) Елисеев, Д.П. Исследование влияния линейных вибраций на ММГ RR типа с учетом нелинейности емкостных датчиков /Д.П. Елисеев, А.С. Ковалев // Материалы XV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». – 2014. – С 406- 412.

70) Евстифеев, М.И. Методы повышения стойкости микромеханических гироскопов к механическим воздействиям/ М.И. Евстифеев, Д.П. Елисеев, Челпанов// Гироскопия и навигация. – 2014. – №.4. – С. 56-68

71) Евстифеев М. И. Микромеханический гироскоп RR-типа с подвижным электродом / М. И. Евстифеев, Д. П. Елисеев, И. Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. – 2015. – №.4. – С.62-71.

## **ДОДАТКИ**

## Додаток 1

## М-файл одномасний ММГ

```

clc, clear all
format long g

global Wz_const Wz_om_max Wz_freq
global Omega_y Omegay_max Omegay_freq
global k_DM1 U1 d R k_DM2 U2 Ix1 Ix2 m1 m2
global ksiz_1 wz_1 ksig_1 wg_1 gam_max lmd
global ksia_1 wa_1 ksiz_2 wz_2 ksia_2 wa_2
global k_DU1 k_DU2

d2r=pi/180;

% власні частоти УП гіроскопа типу ММГ-2:
wa_1 = 20420;           %рад/с
wg_1 = 18944;
% wz_1 = 57805;
wz_1 = 57805

lmd=1*wg_1;           %частота первинних коливань

Omegax_max=0*2*pi/180;
Omegax_freq=0.1*2*pi;
Omega_x=0*1.74;       %кутові швидкості основи
Omega_y=0*100*pi/180; %0 - 1.75 рад/с
Omegay_max=1*100*pi/180;
Omegay_freq=1*1*2*pi;
Omega_z=0*1.74;
gam_max =3*pi/180 *1e5;

epsA = 8.5e-12;       %абсолютна діелектрична проникність

ksia_1=0.02;          %коефіцієнти затухання відповідних контурів затухання
IT і ПЕ
ksia_2=0.02;
ksiz_1=0.05;
ksiz_2=0.05;
ksig_1=0.01;

delta_w=0.1;          %(-0.1 - 1.1) - власна частота IT і ПЕ

delta_DM=1;           %0.9 - 1.1 - площі
delta_DU=1;           %0.9 - 1.1

wz_2 = (wz_1)*(1+delta_w); %власна частота поступальний коливань ПЕ по осі
Z
wa_2=(wa_1)*(1+delta_w);  %власна частота кутових коливань ПЕ по осі X

m1=8e-7;              %маса IT
m2=8e-7;              %маас ПЕ
m=m1;

Ix1=5.25e-13          %кг*м^2      момент інерції IT по осі X
Ix2=5.25e-13;         %              момент інерції ПЕ по осі X

```



```

Iz1=7.26e-13;          %          момент інерції IT по осі Z

epsg_m=1e6*3*pi/180;          %
% epsa_1_DM=(1/Ix1)/((F1-F2)/R);
% epsa_2_DM=(1/Ix2)/((F1-F2)/R);

S_DM1=0.3*1e-6;          %площі електродів ДМ
S_DM2=delta_DM*S_DM1;
S_DU1=1*1e-6;          %
S_DU2=delta_DU*S_DU1;

d=2e-6;          %зазор між обкладками ДМ і ДУ
R=1.025e-3;          %середній радіус розташування електродів ДМ і ДУ

k_DM1=(epsA*S_DM1)/2;          %
k_DM2=(epsA*S_DM2)/2;

k_DU1=(epsA*S_DU1);          %
k_DU2=(epsA*S_DU2);

U1=5;          %напруги на електродах ДМ
U2=5;

Wx=0;
Wy=0;
Wz1=0*980;
Wz_const=0;
Wz_om_max=0*300;
Wz_freq=0*100*2*pi;
% F1=k_DM1*(U1^2)*((d-(z1-z2)-(a1-a2)*R)^(-2));
% F2=k_DM2*(U2^2)*((d-(z1-z2)+(a1-a2)*R)^(-2));

y0=zeros(10,1);
T_end = 1;
% fs=100;% [Гц]
% options = odeset('RelTol',1e-2);
options = odeset('RelTol',1e-5);
% options = odeset('RelTol',1e-8, 'AbsTol',1e-10);
% tspan = [0:1/fs:T_end];
tspan = [0 T_end];
% [tout,yout] = ode45('mmg_ruh_electrodu', tspan, y0', options);
[tout,yout] = ode15s('mmg_ruh_electrodu', tspan, y0', options);

%%% -----
%%% Виведення графіків та певна ПОСТ-обробка сигналів

figure(1)
subplot(3,1,1)
plot(tout, yout(:,3)/d2r,'LineWidth',2),grid
ylabel('gamma, градуси')

subplot(3,1,2)
plot(tout, yout(:,1),'LineWidth',2),grid
ylabel('Z1, м')

subplot(3,1,3)
plot(tout, yout(:,7),'LineWidth',2),grid

```

```

ylabel('Z2, м')

figure(2)
subplot(3,1,1)
plot(tout, yout(:,5)/d2r, 'LineWidth',2),grid
title('Вторинні коливання ЧЕ')
ylabel('Alpha1, градуси')

subplot(3,1,2)
plot(tout, yout(:,9)/d2r, 'LineWidth',2),grid
title('Кутові коливання рухомого елемента')
ylabel('Alpha2, градуси')

subplot(3,1,3)
plot(tout, yout(:,5)/d2r - yout(:,9)/d2r, 'LineWidth',2),grid
ylabel('ALPHA_DM, градуси')

figure(3)
plot(tout, yout(:,5)/d2r + yout(:,9)/d2r, 'LineWidth',2),grid
title('Інформаційний сигнал')
ylabel('Alpha, градуси')

alpha1_max=max(yout((end-5000):end,5)/d2r)
alpha2_max=max(yout((end-5000):end,9)/d2r)
alpha_DM_max = max( yout(:,5)/d2r - yout(:,9)/d2r)
alpha_DM_min = min( yout(:,5)/d2r - yout(:,9)/d2r)
alpha_MMG_max = max( yout(:,5)/d2r + yout(:,9)/d2r)
alpha_MMG_min = min( yout(:,5)/d2r + yout(:,9)/d2r)

ZZ = yout(:,1) - yout(:,7);
alpha = yout(:,5) - yout(:,9);
C1 = k_DU1./(d - ZZ - alpha*R);
C2 = k_DU2./(d - ZZ + alpha*R);
delta_C = C1 - C2;
dC_na_alpha = delta_C./alpha;

envelope = abs(hilbert(alpha));

fs_new=1e5;
fc =lmd/2/pi;% Частота зрізу низькочастотного фільтра 2 кГц

[alpha_resample,Ty] = resample(alpha,tout,fs_new) ;
% [ZZ_resample,Ty] = resample(ZZ,tout) ;
sin_demodul = sin(lmd*Ty);
cos_demodul = cos(lmd*Ty);

y1 = alpha_resample.*cos_demodul;
y2 = alpha_resample.*sin_demodul;

Wn = 2000/(fs_new/2);
[num,den] = butter(5,Wn); % Butterworth filter design

```

```

y1_filt = filter(num,den, y1) ;
y2_filt = filter(num,den, y2) ;

ysyg_demodul = sign(y2_filt) .* sqrt(y1_filt.^2 + y2_filt.^2);

k_pered_ALL=100/100.0008*50/49.998 * 100/100.001 * 100/2.2291*1e11;
if(0.1==delta_w)
    k_pered_ALL = 100/142.3707 * k_pered_ALL;
end
s1= k_pered_ALL*filter(num,den, ysyg_demodul);
    sm_length=301;
s1_filt = smooth(s1, sm_length, 'lowess');

NNN = max(size(s1));
figure(4)
subplot(2,1,1)
plot(Ty(1e2:(NNN-1e4)),s1(1e2:(NNN-1e4))/d2r,'b'), grid
title('Демодульований сигнал вторинних коливань')
ylabel('Кутова швидкість \Omega_y, градус/с')
xlabel('Час, с')

subplot(2,1,2)
plot(Ty(1e2:(NNN-1e4)),s1_filt(1e2:(NNN-1e4))/d2r,'b'), grid
title('ВІДФІЛЬТРОВАНИЙ Демодульований сигнал вторинних коливань')
ylabel('Кутова швидкість \Omega_y, градус/с')
xlabel('Час, с')

function z=mmg_ruh_electrodu(t,y)

global Wz_const Wz_om_max Wz_freq
global Omega_y Omegay_max Omegay_freq
global k_DM1 U1 d R k_DM2 U2 Ix1 Ix2 m1 m2
global ksiz_1 wz_1 ksiz_2 wg_1 gam_max lmd
global ksia_1 wa_1 ksiz_2 wz_2 ksia_2 wa_2

prusk_Z = Wz_const + Wz_om_max*sin(Wz_freq*t);
Omy = Omega_y + Omegay_max*sin(Omegay_freq*t);

alpha = y(5) - y(9);
ZZ = y(1) - y(7);
F1 = k_DM1*U1^2/(d-ZZ-alpha*R)^2;
F2 = k_DM2*U2^2/(d-ZZ+alpha*R)^2;
Mdm_al = (F1-F2)/R;
eps_all_dm = Mdm_al/Ix1;
eps_al2_dm = Mdm_al/Ix2;

W1 = F1/m1;
W2 = F2/m2;

z(1) = y(2);
z(2) = -2*ksiz_1*wz_1*y(2) - wz_1^2*y(1) + prusk_Z + (W1+W2);
z(3) = y(4);
z(4) = -2*ksiz_1*wg_1*y(4) - wg_1^2*y(3) + gam_max*sin(lmd*t);
z(5) = y(6);
z(6) = -2*ksia_1*wa_1*y(6) - wa_1^2*y(5) - 2*Omy * y(4) + 1*eps_all_dm;

```

```
z(7) = y(8);  
z(8) = -2*ksiz_2*wz_2*y(8) - wz_2^2*y(7) + prusk_Z - (W1+W2);  
z(9) = y(10);  
z(10) = -2*ksia_2*wa_2*y(10) - wa_2^2*y(9) - 1*eps_al2_dm;  
z=z';
```

```
end
```

## Додаток 2

## М-файл двохмасний ММГ

```

clc, clear all
format long g

global Wz_const Wz_om_max Wz_freq
global Omega_y Omegay_max Omegay_freq
global k_DM1 U1 d R k_DM2 U2 Ix1 Ix2 m1 m2
global ksiz_1 wz_1 ksig_1 wg_1 gam_max lmd
global ksia_1 wa_1 ksiz_2 wz_2 ksia_2 wa_2
global k_DU1 k_DU2

global ksiz_1_2 wz_1_2 ksig_1_2 wg_1_2 lmd_2
global ksia_1_2 wa_1_2 ksiz_2_2 wz_2_2 ksia_2_2 wa_2_2

d2r=pi/180;

% власні частоти УП гіроскопа типу ММГ-2:
wa_1 = 20420;           %рад/с
wg_1 = 18944;
% wz_1 = 57805;
wz_1 = 57805

lmd=1*wg_1;           %частота первинних коливань

dGAMMA = 0 * 0.05/100; % різниця власних частот первинних коливань
                    % задається у відсотках
% власні частоти ІТ 2-го гіроскопа типу ММГ-2:
wa_1_2 = 20420;           %рад/с
wg_1_2 = 18944*(1+dGAMMA);
% wz_1 = 57805;
wz_1_2 = 57805

lmd_2=1*lmd;           %частота первинних коливань

Omegax_max=0*2*pi/180;
Omegax_freq=0.1*2*pi;
Omega_x=0*1.74;           %кутові швидкості основи
Omega_y=0*100*pi/180;     %0 - 1.75 рад/с
Omegay_max=1*100*pi/180;
Omegay_freq=1*1*2*pi;
Omega_z=0*1.74;
gam_max =3*pi/180 *1e5;

epsA = 8.5e-12;           %абсолютна діелектрична проникність

ksia_1=0.02; % 1 гіроскоп

```

```

ksia_2=0.02; %коефіцієнти затування відповідних контурів затування ІТ і ПЕ
ksiz_1=0.05;
ksiz_2=0.05;
ksig_1=0.01;

ksia_1_2=0.02; % 2 ripосокп
ksia_2_2=0.02; % коефіцієнти затування відповідних контурів затування ІТ і ПЕ
ksiz_1_2=0.05;
ksiz_2_2=0.05;
ksig_1_2=0.01;

delta_w=0.1; %(-0.1 - 1.1) - власна частота ІТ і ПЕ
delta_w_2=0.1; %(-0.1 - 1.1) - власна частота ІТ і ПЕ

delta_DM=1; %0.9 - 1.1 - площі
delta_DU=1; %0.9 - 1.1

% 1 ripосокп
wz_2 = (wz_1)*(1+delta_w); %власна частота поступальний коливань ПЕ по осі Z
wa_2=(wa_1)*(1+delta_w); %власна частота кутових коливань ПЕ по осі X

% 2 ripосокп
wz_2_2 = (wz_1_2)*(1+delta_w_2); %власна частота поступальний коливань ПЕ по осі Z
wa_2_2 = (wa_1_2)*(1+delta_w_2); %власна частота кутових коливань ПЕ по осі X

m1=8e-7; %маса ІТ
m2=8e-7; %маас ПЕ
m=m1;

Ix1=5.25e-13 %кг*м^2 момент інерції ІТ по осі X
Ix2=5.25e-13; % момент інерції ПЕ по осі X
Iz1=7.26e-13; % момент інерції ІТ по осі Z

epsg_m=1e6*3*pi/180; %
% epsa_1_DM=(1/Ix1)/((F1-F2)/R);
% epsa_2_DM=(1/Ix2)/((F1-F2)/R);

S_DM1=0.3*1e-6; %площі електродів ДМ
S_DM2=delta_DM*S_DM1;
S_DU1=1*1e-6; %
S_DU2=delta_DU*S_DU1;

d=2e-6; %зазор між обкладками ДМ і ДУ
R=1.025e-3; %середній радіус розташування електродів ДМ і ДУ

k_DM1=(epsA*S_DM1)/2; %
k_DM2=(epsA*S_DM2)/2;

k_DU1=(epsA*S_DU1); %
k_DU2=(epsA*S_DU2);

U1=5; %напруги на електродах ДМ
U2=5;

```

```

Wx=0;
Wy=0;
Wz1=0*980;
Wz_const=0*250;
Wz_om_max=0*300;
Wz_freq=0*100*2*pi;
% F1=k_DM1*(U1^2)*((d-(z1-z2)-(a1-a2)*R)^(-2));
% F2=k_DM2*(U2^2)*((d-(z1-z2)+(a1-a2)*R)^(-2));

y0=zeros(20,1);
T_end = 1;
% fs=100;% [Гц]
% options = odeset('RelTol',1e-2);
options = odeset('RelTol',1e-5);
% options = odeset('RelTol',1e-8, 'AbsTol',1e-10);
% tspan = [0:1/fs:T_end];
tspan = [0 T_end];
% [tout,yout] = ode45('mmg_ruh_electrodu', tspan, y0', options);
[tout,yout] = ode15s('mmg_ruh_electrodu_2M', tspan, y0', options);

%%% -----
%%% Виведення графіків та певна ПОСТ-обробка сигналів

figure(1)
subplot(3,1,1)
plot(tout, yout(:,3)/d2r, 'LineWidth',2),grid
ylabel('gamma, градуси')

subplot(3,1,2)
plot(tout, yout(:,1), 'LineWidth',2),grid
ylabel('Z1, м')

subplot(3,1,3)
plot(tout, yout(:,7), 'LineWidth',2),grid
ylabel('Z2, м')

figure(2)
subplot(3,1,1)
plot(tout, yout(:,5)/d2r, 'LineWidth',2),grid
title('Вторинні коливання ЧЕ')
ylabel('Alpha1, градуси')

subplot(3,1,2)
plot(tout, yout(:,9)/d2r, 'LineWidth',2),grid
title('Кутові коливання рухомого елемента')
ylabel('Alpha2, градуси')

subplot(3,1,3)
plot(tout, yout(:,5)/d2r - yout(:,9)/d2r, 'LineWidth',2),grid

```

```

ylabel('ALPHA_DM,   градуси')

figure(3)
plot(tout, yout(:,5)/d2r + yout(:,9)/d2r, 'LineWidth',2),grid
title('Інформаційний сигнал')
ylabel('Alpha,   градуси')

alpha1_max=max(yout((end-5000):end,5)/d2r)
alpha2_max=max(yout((end-5000):end,9)/d2r)
alpha_DM_max = max( yout(:,5)/d2r - yout(:,9)/d2r)
alpha_DM_min = min( yout(:,5)/d2r - yout(:,9)/d2r)
alpha_MMG_max = max( yout(:,5)/d2r + yout(:,9)/d2r)
alpha_MMG_min = min( yout(:,5)/d2r + yout(:,9)/d2r)

% 1 ripоскоп
ZZ = yout(:,1) - yout(:,7);
alpha = yout(:,5) - yout(:,9);
C1 = k_DU1./(d - ZZ - alpha*R);
C2 = k_DU2./(d - ZZ + alpha*R);
delta_C = C1 - C2;
dC_na_alpha = delta_C./alpha;

% 2 ripоскоп
ZZ_2 = yout(:,11) - yout(:,17);
alpha_2 = yout(:,15) - yout(:,19);
C1_2 = k_DU1./(d - ZZ_2 - alpha_2*R);
C2_2 = k_DU2./(d - ZZ_2 + alpha_2*R);
delta_C_2 = C1_2 - C2_2;
dC_na_alpha_2 = delta_C_2./alpha_2;

alpha_2MMG_min = 0.5*(alpha - alpha_2);
alpha_2MMG_plus = 0.5*(alpha + alpha_2);

envelope = abs(hilbert(alpha));

fs_new=1e5;
fc =lmd/2/pi;% Частота зрізу низькочастотного фільтра 2 кГц

% [alpha_resample,Ty] = resample(alpha,tout,fs_new) ;

%
[alpha_resample,Ty] = resample(alpha_2MMG_min,tout,fs_new) ;
% [alpha_resample,Ty] = resample(alpha_2MMG_plus,tout,fs_new) ;

sin_demodul = sin(lmd*Ty);
cos_demodul = cos(lmd*Ty);

y1 = alpha_resample.*cos_demodul;
y2 = alpha_resample.*sin_demodul;

```



```

Wn = 2000/(fs_new/2);
[num,den] = butter(5,Wn);           % Butterworth filter design

y1_filt = filter(num,den, y1) ;
y2_filt = filter(num,den, y2) ;

ysyg_demodul = sign(y2_filt) .* sqrt(y1_filt.^2 + y2_filt.^2);

k_pered_ALL=1*100/100.0008*50/49.998 * 100/100.001 * 100/2.2291*1e11;
if(0.1==delta_w)
    k_pered_ALL =1* 100/142.3707 * k_pered_ALL;
end
s1= k_pered_ALL*filter(num,den, ysyg_demodul);
    sm_length=301;
s1_filt = smooth(s1, sm_length, 'lowess');

NNN = max(size(s1));
figure(4)
subplot(2,1,1)
plot(Ty(1e2:(NNN-1e4)),s1(1e2:(NNN-1e4))/d2r,'b'), grid
title('Демодульований сигнал вторинних коливань')
ylabel('Кутова швидкість \Omega_y, градус/с')
xlabel('Час, с')

subplot(2,1,2)
plot(Ty(1e2:(NNN-1e4)),s1_filt(1e2:(NNN-1e4))/d2r,'b'), grid
title('ВІДФІЛЬТРОВАНИЙ Демодульований сигнал вторинних коливань')
ylabel('Кутова швидкість \Omega_y, градус/с')
xlabel('Час, с')

function z=mmg_ruh_electrodu(t,y)

global Wz_const Wz_om_max Wz_freq
global Omega_y Omegay_max Omegay_freq
global k_DM1 U1 d R k_DM2 U2 Ix1 Ix2 m1 m2
global ksiz_1 wz_1 ksig_1 wg_1 gam_max lmd
global ksia_1 wa_1 ksiz_2 wz_2 ksia_2 wa_2

global ksiz_1_2 wz_1_2 ksig_1_2 wg_1_2 lmd_2
global ksia_1_2 wa_1_2 ksiz_2_2 wz_2_2 ksia_2_2 wa_2_2

prusk_Z = Wz_const + Wz_om_max*sin(Wz_freq*t);
Omy = Omega_y + Omegay_max*sin(Omegay_freq*t);

alpha = y(5) - y(9);
ZZ = y(1) - y(7);
F1 = k_DM1*U1^2/(d-ZZ-alpha*R)^2;
F2 = k_DM2*U2^2/(d-ZZ+alpha*R)^2;
Mdm_al = (F1-F2)/R;
eps_all_dm = Mdm_al/Ix1;
eps_al2_dm = Mdm_al/Ix2;

```

```
W1 = F1/m1;
W2 = F2/m2;
```

```
z(1) = y(2);
z(2) = -2*ksiz_1*wz_1*y(2) - wz_1^2*y(1) + prusk_Z + (W1+W2);
z(3) = y(4);
z(4) = -2*ksig_1*wg_1*y(4) - wg_1^2*y(3) + gam_max*sin(lmd*t);
z(5) = y(6);
z(6) = -2*ksia_1*wa_1*y(6) - wa_1^2*y(5) - 2*Omy * y(4) ...
      + 1*eps_all_dm;
```

```
z(7) = y(8);
z(8) = -2*ksiz_2*wz_2*y(8) - wz_2^2*y(7) + prusk_Z - (W1+W2);
z(9) = y(10);
z(10) = -2*ksia_2*wa_2*y(10) - wa_2^2*y(9) - 1*eps_al2_dm;
```

```
%%% Другий гіроскоп, тільки з протифазним збудженням первинних коливань
```

```
alpha_2 = y(15) - y(19);
ZZ_2 = y(11) - y(17);
F1_2 = k_DM1*U1^2/(d-ZZ_2-alpha_2*R)^2;
F2_2 = k_DM2*U2^2/(d-ZZ_2+alpha_2*R)^2;
Mdm_al_2 = (F1_2-F2_2)/R;
eps_all_dm_2 = Mdm_al_2/Ix1;
eps_al2_dm_2 = Mdm_al_2/Ix2;
```

```
W1_2 = F1_2/m1;
W2_2 = F2_2/m2;
```

```
z(11) = y(12);
z(12) = -2*ksiz_1_2*wz_1_2*y(12) - wz_1_2^2*y(11) - prusk_Z + (W1_2+W2_2);
z(13) = y(14);
z(14) = -2*ksig_1_2*wg_1_2*y(14) - wg_1_2^2*y(13) - gam_max*sin(lmd_2*t);
z(15) = y(16);
z(16) = -2*ksia_1_2*wa_1_2*y(16) - wa_1_2^2*y(15) - 2*Omy * y(14) ...
      + 1*eps_all_dm_2;
```

```
z(17) = y(18);
z(18) = -2*ksiz_2_2*wz_2_2*y(18) - wz_2_2^2*y(17) - prusk_Z - (W1_2+W2_2);
z(19) = y(20);
z(20) = -2*ksia_2_2*wa_2_2*y(20) - wa_2_2^2*y(19) - 1*eps_al2_dm_2;
```

```
z=z';
```

```
end
```